

# Parametrisierung der Strahlungsflüsse am Boden

Diplomarbeit  
von  
Torben Meinert

MATHEMATISCH - NATURWISSENSCHAFTLICHE FAKULTÄT DER  
CHRISTIAN-ALBRECHTS-UNIVERSITÄT ZU KIEL  
ERSTELLT AM LEIBNIZ - INSTITUT FÜR MEERESWISSENSCHAFTEN  
FORSCHUNGSBEREICH 1  
- MARITIME METEOROLOGIE -



Kiel, Januar 2007



# Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den Wechselwirkungen zwischen Wolken und elektromagnetischer Strahlung auf der Basis von langjährigen synoptischen Beobachtungen über Kiel. Es werden zunächst Jahresgänge der Bilanzen aus solarer und langwelliger Strahlung errechnet. Bilanzextrema sollen mit Hilfe der synoptischen Situation erklärt werden.

Frühsommerliche Tage mit geringer Bewölkung weisen die höchsten positiven Bilanzbeträge auf. Die solare Einstrahlung ist entsprechend dem Jahresgang sehr hoch, allerdings hat die für die langwellige Ausstrahlung verantwortliche Wassertemperatur ihr Maximum noch nicht erreicht. Dagegen stellen frühwinterliche bewölkungsarme Tage Minima bezüglich der Netto-Strahlungsenergiebilanz dar. Die solare Einstrahlung ist fast minimal. Durch die geringe Bewölkung ist die langwellige Gegenstrahlung kleiner als die thermische Abstrahlung (Wassertemperatur noch nicht minimal).

Die Strahlungsbilanz wird außerdem gesondert für die solare Strahlungsflussdichte gerechnet. Hierbei werden sommerliche Hochdrucklagen als Ursache für Maxima und tiefe persistente Bewölkung an winterlichen Tagen als Ursache für Minima der über einen Tag aufsummierten Solarstrahlung erkannt.

Es werden Versuche unternommen, um die terrestrische Strahlungsflussdichte anhand von Messungen der Wolkenunterkantenhöhe zu parametrisieren. Ein erster Ansatz führt auf die Berechnung der Wolkenbasistemperatur, aus welcher nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz die langwellige Gegenstrahlung ermittelt wird. Hierzu werden sehr einschränkende Annahmen gemacht. So wird grundsätzlich von einem trockenadiabatischen Temperaturprofil unterhalb der Wolkenbasis ausgegangen. Daneben wird der Bedeckungsgrad aus den Ceilometermessungen abgeschätzt. Die Ergebnisse zeigen auf, dass dieser Ansatz keine befriedigende Parametrisierung der langwelligen Strahlungsflussdichte ist, weil besonders Abweichungen vom trockenadiabatischen Temperaturgradienten für große Differenzen zwischen Messung und Berechnung sorgen.

Deutliche Verbesserungen bei der langwelligen Strahlungsparametrisierung erbringt die Formel von Josey et al. (2003), welche die Taupunktdifferenz am Boden mit berücksichtigt. Es kann eine Korrelation zwischen Messwerten und Parametrisierungsergebnissen über das Jahr 2003 von 0,858 hergestellt werden. Anhand einer Fallstudie werden Schwächen der Josey-Formel deutlich, die auf der Vernachlässigung der Wolkenhöhe beruhen.

Eine Modifikation der Josey-Parametrisierung schließt eine lineare Abhängigkeit der Strahlungstemperatur von der Wolkenhöhe ein. Damit wird die Korrelation bei bedecktem Himmel von 0,787 (Josey) auf 0,801 leicht verbessert. Als Unzulänglichkeit jeder der hier gerechneten Parametrisierungen wird die mangelnde Erfassung des Himmelszustandes angesehen, weil kein zweidimensionales Himmelsbild gewonnen werden kann.

Zur Parametrisierung der kurzwelligen Strahlungsflussdichte werden Algorithmen von Lumb (1964), Lind et al. (1984), Dobson und Smith (1988) (lineare und nichtlineare Parametrisierung) und Zillman (1972) für drei Beispieltage gerechnet. Während die nichtlineare Formel von Dobson und Smith bei Cumulus- und Schauerbewölkung (01.07.2006, bzw. 14.04.2006) die besten Resul-

tate liefert, sind die Abweichungen zu den Messwerten an einem Tag mit ausgeprägt stratiformer Bewölkung (04.06.2006) deutlich größer als bei den anderen Parametrisierungen. Dabei sind die Algorithmen nach Lind und Lumb an Tagen mit schichtenförmiger Bewölkung vorteilhafter als an durch Konvektion dominierten Tagen. Insgesamt kann keine der vorgestellten Parametrisierungen favorisiert werden.

Ein Ausblick verdeutlicht die Notwendigkeit, Parameter der freien Atmosphäre (Bewölkungsverteilung, Temperatur- und Feuchteprofil, LWP) durch Vertikalsondierung mit Hilfe von Radar und Mikrowellenradiometrie besser zu erfassen.

# Abstract

This thesis deals with the interactions between clouds and electromagnetic radiation based on long-term synoptical observations at Kiel.

The first point is a calculation of the radiation energy balance made up by the incoming shortwave and longwave radiation and the longwave outgoing radiation calculated for each day. The extreme balance values will be explained by evaluating the synoptical situation. Early summer days with little clouds are likely to produce balance maxima. The solar irradiation is high according to the annual variation whereas the sea surface temperature, which is responsible for thermal emission, has not reached its maximum yet. On the other hand early winter days with little clouds yield minima of the radiation balance. The solar irradiation is close to the annual minimum. The lack of clouds makes up a small amount of longwave radiation. As the water temperature is not minimal yet, the thermal emission is higher than the terrestrial irradiation.

The radiation balance will be calculated separately for the shortwave irradiation. Summerly high pressure areas produce maxima of the solar radiation flux density summated over one day, whereas winter days with low clouds represent minima.

The incoming longwave radiation will be parameterized. In a first attempt the cloud base temperature will be calculated yielding the longwave emission by using the Stefan-Boltzmann law. Some restricting assumptions are made for this: Basically the temperature slope below the cloud base is dry adiabatic. The cloud coverage is estimated using the ceilometer data. The results show that this attempt is not a satisfactory parameterization of the longwave radiation flux density. If the real temperature slope differs from the dry adiabatic state, major differences between parameterization and measurement occur.

Drastic improvements in parameterizing the incoming longwave radiation are obtained by using the formula of Josey et al. (2003), which includes the dewpoint difference near the ground. A correlation of 0.858 between measured values and results over the year 2003 can be calculated. From a case study some deficits of Josey's formula are shown, which are based on ignoring the cloud height.

A modification of Josey's formula includes a linear dependency of the radiation temperature on the cloud base height. The correlation is improved slightly from 0.787 (Josey) to 0.801 in cases of obscured sky.

The lack of recording the entire sky conditions remains an insufficiency of all parameterizations calculated in this thesis, because no 2-dimensional cloud information can be obtained.

To parameterize the shortwave radiation flux density algorithms of Lumb (1964), Lind et al. (1984), Dobson and Smith (1988) (linear and non-linear parameterization) and Zillman (1972) are computed on three exemplary days. The non-linear formula of Dobson and Smith produces the best results for cumulus and shower clouds (07/01/2006 and 04/14/2006) whereas the differences to the measured values on a stratiform-clouded day (06/04/2006) are distinctly higher than the ones calculated with the other parameterizations. In the case of stratiform clouds the algorithms of Lund and Lind are more suitable than in situations with convective clouds. All in

all none of the shortwave parameterizations calculated in this thesis can be entirely preferred. The outlook stresses the necessity to record parameters of the free atmosphere like cloud distribution, temperature and humidity slopes and LWP by vertical sounding based on radar technology and microwave radiometry.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>1 Strahlungs-Grundlagen und Daten</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung . . . . .	1
1.2 Radiometrische Größen . . . . .	3
1.3 Die verwendeten Messgeräte und ihre Aufstellung . . . . .	5
1.3.1 Das Ceilometer . . . . .	5
1.3.2 Messgeräte für weitere meteorologische Daten . . . . .	7
1.4 Wolkenkamera . . . . .	7
1.5 Wetterstation Kiel-Holtenau . . . . .	8
1.6 Datenbestand . . . . .	8
1.7 Strahlungsparametrisierungen im Rahmen von "MORE" . . . . .	9
<b>2 Jahresverlauf der solaren und terrestrischen Strahlung</b>	<b>11</b>
2.1 Bilanzmaxima und zugehörige Wetterlagen . . . . .	12
2.1.1 28.05.2005: fröhsommerliche Hochdrucklage . . . . .	12
2.1.2 21.06.1998: fröhsommerliche Südlage . . . . .	15
2.2 Bilanzminima und zugehörige Wetterlagen . . . . .	17
2.2.1 13.12.2002: fröhwinterliche Hochdrucklage . . . . .	17
2.2.2 15.12.2003: fröhwinterliche Nordwestlage . . . . .	20
2.3 Jahresgang der täglichen Strahlungsbilanzen: Das Beispiel 2003 . . . . .	22
2.4 Tagessummen der solaren Einstrahlung . . . . .	23
2.4.1 Maximum der Tagessummen: 09.07.1999 . . . . .	23
2.4.2 Minimum der Tagessummen: 06.12.2002 . . . . .	25
<b>3 Parametrisierung der langwelligen Gegenstrahlung</b>	<b>29</b>
3.1 Erster Ansatz: Berechnung der langwelligen Gegenstrahlung aus der Wolkenbasistemperatur . . . . .	29
3.1.1 Voraussetzungen . . . . .	29
3.1.2 Ergebnisse: Statistik der Gegenstrahlung über das Jahr 2003 . . . . .	32
3.1.3 Fallstudie: Verlauf von Wolkenhöhe, Strahlungshöhe und Bedeckungsgrad am 6./7. Februar 2003 . . . . .	35

3.2	Parametrisierung nach Josey et al. (2003) . . . . .	37
3.2.1	Theoretische Grundlagen . . . . .	37
3.2.2	Ergebnisse . . . . .	38
3.3	Entwicklung einer modifizierten Parametrisierungsformel: Berücksichtigung der Wolkenhöhe . . . . .	40
3.3.1	Separationsansatz . . . . .	41
3.4	Fazit . . . . .	45
<b>4</b>	<b>Parametrisierung der kurzwelligen Einstrahlung</b>	<b>51</b>
4.1	Grundlagen . . . . .	51
4.2	Die verwendeten Algorithmen . . . . .	53
4.2.1	Lumb (1964) . . . . .	53
4.2.2	Lind et al. (1984) . . . . .	53
4.2.3	Lineare Parametrisierung nach Dobson und Smith (1988) . . . . .	54
4.2.4	Nichtlineare Parametrisierung nach Dobson und Smith (1988) . . . . .	54
4.2.5	Zillman (1972), Kalisch (2006) . . . . .	55
4.3	14.04.2006: inhomogene Schauerbewölkung . . . . .	56
4.3.1	Lumb und Lind . . . . .	56
4.3.2	Dobson / Smith, nichtlineare Parametrisierung . . . . .	59
4.3.3	Zillman und Kalisch . . . . .	61
4.3.4	Dobson / Smith, lineare Parametrisierung . . . . .	63
4.4	01.07.2006: sommerliche Cumulus-Bewölkung . . . . .	65
4.4.1	Lumb und Lind . . . . .	65
4.4.2	Dobson / Smith, nichtlineare Parametrisierung . . . . .	68
4.4.3	Zillman und Kalisch . . . . .	69
4.4.4	Dobson / Smith, lineare Parametrisierung . . . . .	72
4.5	04.06.2006: Stratocumulus-Bewölkung . . . . .	73
4.5.1	Lumb und Lind . . . . .	74
4.5.2	Dobson / Smith, nichtlineare Parametrisierung . . . . .	76
4.5.3	Zillman und Kalisch . . . . .	78
4.5.4	Dobson / Smith, lineare Parametrisierung . . . . .	81
4.6	Zusammenfassung . . . . .	82
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>85</b>
	<b>Anhang</b>	<b>94</b>
<b>A</b>	<b>Jahresgänge der täglichen Strahlungsbilanzen und ihrer Beiträge</b>	<b>95</b>
<b>B</b>	<b>Abkürzungen und Wolkenschlüssel</b>	<b>99</b>
	<b>Literatur</b>	<b>101</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>103</b>







# Kapitel 1

## Strahlungs-Grundlagen und Daten

### 1.1 Problemstellung

Die elektromagnetische Strahlung, die von der Sonne emittiert wird, ist der hauptsächliche Antrieb für alle physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse auf unserer Erde. Speziell für das Erdklima kommt ihr eine besondere Bedeutung zu, die es notwendig macht, ihre Eigenschaften und Wechselwirkung mit weiteren Klimakomponenten genauestens zu untersuchen. Das Spektrum der elektromagnetischen Strahlung lässt sich gemäß Graphik 1.1 einteilen.

Die Sonne kann in guter Näherung als Schwarzkörper aufgefasst werden. Nach dem Planckschen Gesetz (Gleichung 1.1) ist die spektrale Intensität elektromagnetischer Strahlung  $B_\lambda$  von der Temperatur  $T$  des strahlenden Schwarzkörpers sowie der Wellenlänge  $\lambda$  abhängig:

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5(\exp(\frac{hc}{\lambda T}) - 1)} \quad (1.1)$$

Die Lichtgeschwindigkeit  $c$ , das Plancksche Wirkungsquantum  $h$  und die Boltzmann-Konstante  $K$  treten in Gleichung 1.1 als Konstanten auf.

Die Emission der Solarstrahlung findet (vgl. Liou (1980)) hauptsächlich in der äußersten Schicht der Sonne, der 500 km mächtigen und ca. 6000 K heißen Photosphäre, statt. Entsprechend Tabelle 1.1 setzt sich die am Oberrand der Atmosphäre von der Sonne empfangene Strahlung, welche nach der Planck-Formel der Temperatur von 6000 K entspricht, nach Spektralbereichen folgendermaßen zusammen:

Strahlungsart	Wellenlänge in $\mu\text{m}$	Anteil in %
UV-Strahlung	0,29 - 0,4	7
Sichtbare Strahlung	0,4 - 0,73	42
IR-Strahlung	0,73 - 4,0	49
Gesamtstrahlung	0,29 - 4,0	98

**Tabelle 1.1:** Zusammensetzung des solaren Spektrums zwischen 0,29 und 4,0  $\mu\text{m}$  nach DWD (1987)

Die Atmosphäre ist ihrerseits entscheidend am Strahlungshaushalt der Erde beteiligt. Nur ein Teil der von der Sonne eingestrahnten Strahlungsenergie steht dem Erdboden tatsächlich zur Verfügung. Diagramm 1.2 veranschaulicht die Energiebilanz der Erde, aus der die Rolle der atmosphärischen Prozesse hervorgeht.

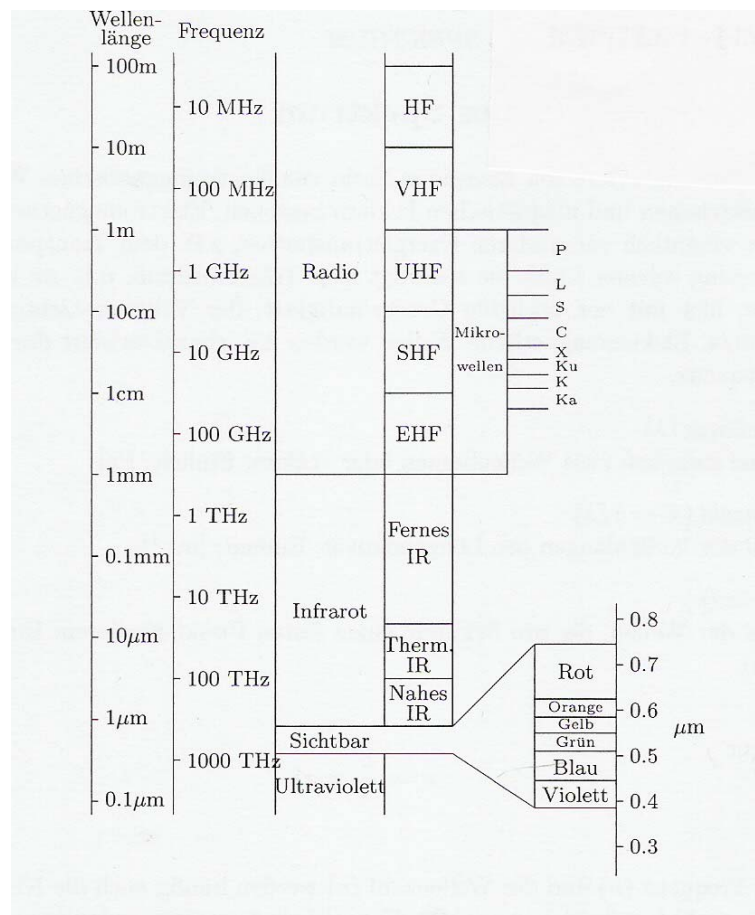


Abbildung 1.1: Übersicht über das elektromagnetische Spektrum. Nach Macke (2004)

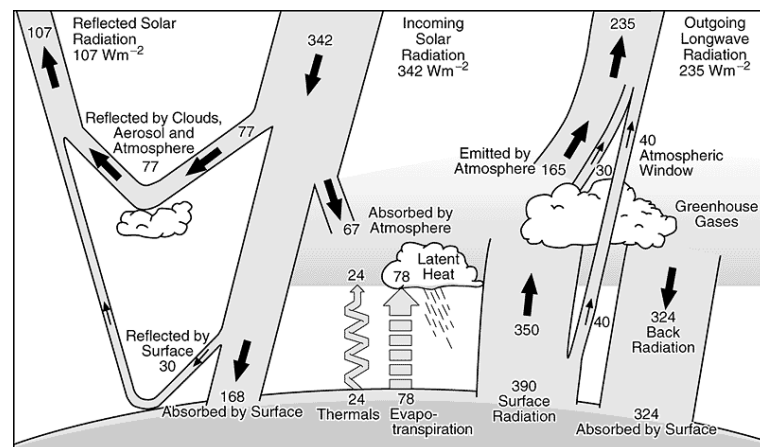


Abbildung 1.2: Energie-Bilanzschema unseres Planeten nach Kiehl und Trenberth (1997)

Daraus wird ersichtlich, dass das Augenmerk bei der Strahlungsparametrisierung nicht nur auf die der Erde zukommende Strahlung gerichtet werden muss. Der hohe Beitrag, den die bewölkte Atmosphäre zur Strahlungsbilanz der Erde leistet, macht es erforderlich, die Wechselwirkungen zwischen Wolken und Strahlung sowohl auf kurzer (Minuten bis Tage) als auch auf langer (Monate bis Jahre) Zeitskala zu untersuchen. Dabei soll die vorliegende Arbeit auf Grundlage der auf dem Dach des IFM-Geomar-Westgebäudes gewonnenen meteorologischen Daten eine Klimatologie der lang- und kurzwelligen Strahlung erstellen. Anschließend erfolgt eine getrennte Betrachtung der terrestrischen und der solaren Strahlung, die auf Parametrisierungen der Strahlungsflussdichten in beiden Spektralbereichen führen wird. Hierzu sind langjährige Messreihen meteorologischer Größen wie Temperatur und relative Feuchte erforderlich. Darüber hinaus müssen Informationen über den Himmelszustand herangezogen werden. Diese lassen sich recht einfach durch die Verwendung eines Ceilometers und die Auswertung von Kamerabilddern des Himmels gewinnen. In einem Ausblick soll auf die Notwendigkeit hingewiesen werden, durch Vertikalsondierung bisher zur Parametrisierung fehlende Informationen über Wasserdampf, Temperatur sowie Flüssigwassermenge zu erhalten.

## 1.2 Radiometrische Größen

Ausgehend von der Strahlungsenergie  $E$  lassen sich folgende weitere radiometrische Messgrößen ableiten:

- Die spektrale Strahlungsenergie  $E_\lambda$ . Sie gibt den Energiebetrag  $dE$  an, der auf ein Wellenlängenintervall  $d\lambda$  entfällt.

$$E_\lambda = \frac{dE}{d\lambda} \quad (1.2)$$

- Die spektrale Strahldichte  $I_\lambda$ . Hierzu sei ein differentieller Betrag der spektralen Strahlungsenergie,  $dE_\lambda$  betrachtet, der in einem Zeitintervall  $dt$  und in einem Wellenlängenintervall  $\lambda + d\lambda$  ein Flächenelement  $dA$  durchquert und auf ein Raumwinkelintervall  $d\Omega$  beschränkt ist. Sei  $\theta$  der Einfallswinkel der Strahlung auf das Flächenelement  $A$ :

$$dE_\lambda = I_\lambda \cos \theta d\Omega dA dt \quad (1.3)$$

In Gleichung 1.3 erscheint die Strahldichte als

$$I_\lambda = \frac{dE_\lambda}{\cos \theta d\Omega d\lambda dt dA} \quad (1.4)$$

- Durch Integration der spektralen Strahldichte über alle Wellenlängen gelangt man zur Strahldichte  $I$ :

$$I = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} I_\lambda d\lambda \quad (1.5)$$

- Der Strahlungsfluss  $f$ . Er ist definiert als der Differentialquotient aus Strahlungsenergie und Zeit:

$$f = \frac{dE}{dt} \quad (1.6)$$

- Integriert man die Strahldichte über den gesamten Raumwinkel, so gelangt man zur Strahlungsflussdichte. Sie ist die Messgröße, die in den Berechnungen in dieser Arbeit die entscheidende Bedeutung hat.

$$F = \int_{\Omega} I_\lambda \cos \theta d\Omega \quad (1.7)$$

Anschaulich gesprochen, ist die Strahlungsflussdichte gleich dem Strahlungsfluss, der in Abhängigkeit vom Einstrahlungswinkel  $\theta$  auf eine Einheitsfläche einfällt.

In Tabelle 1.2 sind die Einheiten der vorgestellten Strahlungsgrößen aufgelistet.

radiometrische Größe	Einheit
Strahlungsenergie $E$	J
spektrale Strahlungsenergie $E_\lambda$	$\frac{J}{m}$
Strahldichte $I$	$\frac{W}{m^2 sr}$
spektrale Strahldichte $I_\lambda$	$\frac{W}{m^3 sr}$
Strahlungsfluss $f$	W
Strahlungsflussdichte $F$	$\frac{W}{m^2}$
spektrale Intensität $B_\lambda$	$\frac{W}{m^3}$

**Tabelle 1.2:** Radiometrische Messgrößen und ihre Einheiten nach Liou(1980)

### 1.3 Die verwendeten Messgeräte und ihre Aufstellung

### 1.3.1 Das Ceilometer

Die Wolkenunterkantenhöhe wird durch ein Ceilometer vom Typ Vaisala CT25K auf dem Dach des Gebäudes West des Leibniz-Instituts für Meeresforschung bestimmt. Im folgenden soll eine Beschreibung des Geräts und seiner Funktionsweise gegeben werden:

Aus dem Ceilometer werden nach dem LIDAR-Prinzip kurze Laserpulse (Pulsdauer: Halbwertszeit 100 ns) mit einer Wellenlänge von 905 nm (infrarot) in senkrechter Richtung nach oben ausgesendet. Diese können an Wolken, Nebel oder Niederschlag gestreut werden und nach einiger Zeit wieder vom Ceilometer empfangen werden. Aus dem einfallenden reflektierten Signal wird ein Rückstreuprofil berechnet. Unter Berücksichtigung der Lichtgeschwindigkeit kann die Zeitdifferenz zwischen dem ausgesendeten Laserpuls und der Wiederkehr des Signals verwendet werden, um die Höhe des Rückstreurotes zu berechnen. Es ist möglich, bis zu drei Rückstreuniveaus gleichzeitig zu bestimmen. Die gemessenen Daten werden auf einem Rechner gesammelt und ausgewertet. Dazu wird der Datenstrom des Ceilometers in Meldungen verschlüsselt. Diese können einen Aufbau wie in Abbildung 1.3 aufweisen.

[illegible]

**Abbildung 1.3:** Ceilometer-Meldung (Bezeichnung gemäß Vaisala (2002): Message 2) mit Hexadezimalcode

In der zweiten Zeile dieser Meldung sind drei fünfstellige Zifferngruppen zu erkennen. Dies sind die (je nach Geräteeinstellung) in Meter oder Fuß angegebenen Wolkenunterkantenhöhen. Der Hexadezimalcode in Abbildung 1.3 wird dazu verwendet, um die graphische Darstellung zu ermöglichen. Die Anwendung CTVIEW, die zur Visualisierung der Datensätze dient, konvertiert diesen Code in eine Farbschattierung, die das jeweilige

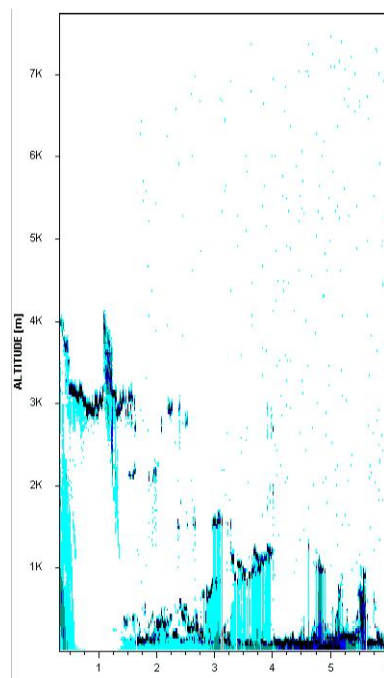
Rückstreusignal in Abhängigkeit von der geometrischen Höhe zeigt. Ein Beispiel für ein solches Diagramm der Wolkenhöhe in Abhängigkeit von der Zeit ist in Abbildung 1.4 gegeben.

Im normalen Betrieb unternimmt das Ceilometer alle 100 Nanosekunden einen Versuch, das gestreute Lasersignal zu empfangen. Daraus werden die Informationen über die Wolkenhöhe gemäß der Gleichung

$$c = \frac{z}{t * \cos \theta} \quad (1.8)$$

gewonnen, wobei

- c die Lichtgeschwindigkeit,
- z die geometrische Wolkenhöhe,
- t die Zeit zwischen Aussenden des Laserpulses und dem Wiedereintreffen des Streusignals und
- $\theta$  der Neigungswinkel des Laserstrahls gegen die Vertikale ist.



**Abbildung 1.4:** Ein Beispiel für eine durch CTVIEW erzeugte Darstellung der Wolkenbasishöhe

Die Auflösung in vertikaler Richtung beträgt 50 Fuß (etwa 15 m). Die Erfassungsgrenze des Ceilometers für hohe Wolken liegt bei 25.000 Fuß (etwa 7.500 m). Damit ist eine zweckmäßige Grenze für die Beobachtungen gegeben: Die höchsten Wolken, die den



Strahlungshaushalt im solaren Bereich beeinflussen (Cirrus, Cirrostratus sowie Cirrocumulus) sind etwa in dieser Höhe anzutreffen. Mittelhohe Wolken (Altostratus / Alto-cumulus) werden vollständig erkannt, sofern sie nicht durch das Vorhandensein einer tiefen Wolkenschicht verdeckt werden.

Der Laserstrahl dringt allerdings nicht tief in Wolken ein. Aus Abbildung 1.4 sowie weiteren Wolkenbasis-Diagrammen geht hervor, dass nur die untersten ca. 50 m einer optisch dicken Wolke an der Streuung beteiligt sind. Damit sind keine Rückschlüsse über die Wolkendicke möglich.

Mit dieser Arbeit fand erstmalig eine intensive Auswertung der am IFM-GEOMAR gewonnenen Ceilometer-Zeitreihen statt.

### 1.3.2 Messgeräte für weitere meteorologische Daten

Die meteorologischen Daten, welche den weiteren Berechnungen zugrunde liegen, werden mit Hilfe folgender Instrumente auf dem Dach des Leibniz-Instituts (Gebäude West) erhalten:

- Die Lufttemperatur wird mit einem Thermometer (Typ PT 100) in 34 m Höhe gemessen.
- Die Messung der relativen Feuchte findet ebenfalls in 34 m Höhe statt.
- Mit einer Windfahne in 36 m Höhe wird die Windrichtung bestimmt.
- Die Windgeschwindigkeit wird mit einem Schalenkreuzanemometer auf einem Mast in 49,5 m Höhe ermittelt.

Es stehen zwei Strahlungsmessgeräte zur Verfügung:

- Ein Pyranometer in 34,5 m Höhe, das die kurzwellige Strahlung im Spektralbereich zwischen 0,3 und 2,8  $\mu\text{m}$  misst.
- Ein Pyrgeometer in gleicher Höhe, das die terrestrische Strahlung im Bereich zwischen 4 und 50  $\mu\text{m}$  erfasst.

## 1.4 Wolkenkamera

Im Sommer 2003 wurde auf dem Dach des Gebäudes West des Leibniz-Instituts eine Kamera installiert, die den Himmel über Kiel erfasst. Alle 30 Sekunden wird ein Voll-Himmels-Bild mit dieser Kamera produziert.

Schade (2005) berechnete aus den Rot-, Grün- und Blau-Werten jedes Pixels eines Wolkenkamerabildes nach Korrekturen (Berücksichtigung von festen Gegenständen auf dem Bild, Lichtreflexe, etc.) eine Näherung für den Bedeckungsgrad. Die RGB-Werte der einzelnen Pixel (vertikale Pixelzahl:  $m$ , horizontale Pixelzahl:  $n$ ) werden in eine Matrix eingespeist:

$$\begin{pmatrix} R(1, 1), G(1, 1), B(1, 1) & R(1, 2), G(1, 2), B(1, 2) & \dots & R(1, n), G(1, n), B(1, n) \\ R(2, 1), G(2, 1), B(2, 1) & R(2, 2), G(2, 2), B(2, 2) & \dots & R(2, n), G(2, n), B(2, n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R(m, 1), G(m, 1), B(m, 1) & R(m, 2), G(m, 2), B(m, 2) & \dots & R(m, n), G(m, n), B(m, n) \end{pmatrix} \quad (1.9)$$

Ist das Verhältnis aus Rot- zu Blau-Wert für ein Pixel größer als ein empirisch gewonnener Schwellenwert, so wird dieser Bildpunkt als bewölkt angesehen. Der in der Arbeit von Schade (2005) sowie in dieser Arbeit berechnete “Quasi-Bedeckungsgrad” (hier mit  $C$  bezeichnet) ist das Verhältnis aus der Anzahl  $n_{\text{cloudy}}$  an “bewölkten” Pixeln zur Gesamtzahl  $n_{\text{total}}$  der Pixel.

$$C = \frac{n_{\text{cloudy}}}{n_{\text{total}}} \quad (1.10)$$

Neben der algorithmischen Auswertung der RGB-Werte zur Bedeckungsgradbestimmung war für die vorliegende Arbeit zudem eine visuelle Beurteilung der Wolkengattung notwendig, welche in einige Parametrisierungen der solaren Strahlungsflussdichte einging.

## 1.5 Wetterstation Kiel-Holtenau

Zur besseren Klassifizierung der synoptischen Situation kann auf die SYNOP-Daten der meteorologischen Station Kiel-Holtenau zurückgegriffen werden. Aus dem Lageplan (Abbildung 1.5) soll aufgrund der geringen Entfernung der Messstandorte die Wetterbeobachtung in Holtenau als repräsentativ für die geographische Lage des Leibniz-Institutes angesehen werden.

## 1.6 Datenbestand

Zur Verfügung stehen sämtliche meteorologische Messdaten, die im Laufe der Jahre 1997 bis 2006 auf dem Dach des Gebäudes West des Leibniz-Instituts für Meeresforschung aufgezeichnet wurden. Darunter sind die Lufttemperatur und die terrestrische sowie die solare Strahlungsflussdichte von zentraler Bedeutung für die Berechnungen in dieser Arbeit.

Außerdem ist ein lückenhafter Bestand an Ceilometerdaten vorhanden, welcher die Jahre 1998 bis 2004 umfasst. Zwischen Mitte 2000 und Oktober 2001 wurde das Ceilometer für Messungen in Nordschweden, auf dem Frachtschiff Ioffe und in Westerland/Sylt eingesetzt, sodass keine für die vorliegende Arbeit verwertbaren Daten vorliegen. Zwischen 2004 und Sommer 2006 stand das Gerät wegen eines Defektes nicht zur Verfügung.

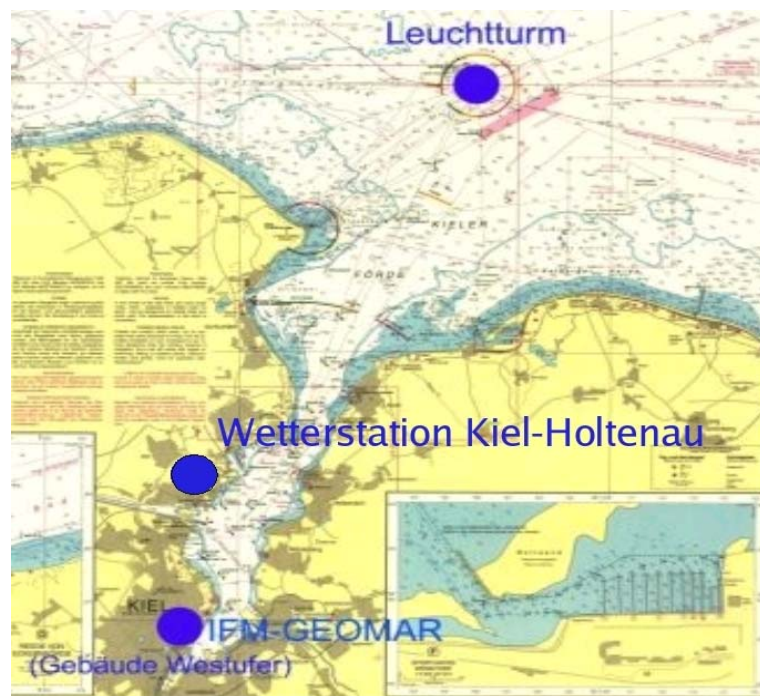
Bei der Berechnung der terrestrischen Strahlungsflussdichte aus den Ceilometermessungen ist zu beachten, dass die Pyrgeometerdaten als 8-Minuten-Mittelwerte vorliegen,

während die Wolkenunterkanten minütlich gemessen werden. Daher wird die Wolkenbasishöhe entsprechend in diesen Messintervallen gemittelt, um eine bessere Vergleichbarkeit der Größen zu erzielen.

Die Wettermeldungen der synoptischen Station Kiel-Holtenau decken den interessierenden Zeitraum ab 1999 ab. Dabei ist die Zeitreihe aus dem Jahr 1999 unvollständig. Auf Basis dieser Meldungen soll auf die vorherrschenden Wolkentypen in den interessierenden Zeiträumen geschlossen werden. Diese synoptischen Daten sind allerdings nur in dreistündigen Abständen verfügbar, sodass nur punktuell entschieden werden kann, inwiefern die Wolken- und Strahlungswechselwirkung auf die Wolkengattung zurückgeführt werden kann.

## 1.7 Strahlungsparametrisierungen im Rahmen von “MORE”

Während der ersten Forschungsfahrt des Meridional Ocean Radiation Experiment MORE im Jahr 2004 wurden Messdaten gewonnen, die als Grundlage für die Untersuchung von Strahlungsparametrisierungen verwendet wurden. In der Diplomarbeit von Kalisch (2005) werden Parametrisierungen von Lumb (1964), Lind et al. (1984), Dobson und Smith (1988) bzw. Zillman (1972) mit der gemessenen solaren Strahlungsflussdichte verglichen.



**Abbildung 1.5:** Lageplan der meteorologischen Messstationen im Bereich Kiel (Quelle: Internetpräsenz des Leibniz-Institutes für Meeresforschung)



## Kapitel 2

# Jahresverlauf der solaren und terrestrischen Strahlung

Um den Einfluss der bewölkten Atmosphäre auf die Nettobilanz aus solarer Einstrahlung und langwelliger Abstrahlung auf synoptisch und klimatologisch relevanten Zeitskalen zu kalkulieren, sollen in diesem Abschnitt Tages- und Jahresbilanzen dieser Strahlungsgrößen erstellt werden.

Zur Berechnung der Tagesbilanzen wurden alle in 8-Minuten-Abständen vorliegenden Messwerte der Solarstrahlung, alle 8-Minuten-Mittelwerte der terrestrischen Gegenstrahlung und die nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz (Gleichung 2.1) erhaltenen Werte der thermischen Abstrahlung aufsummiert.

$$F_{\text{therm.}}^{\uparrow} = \epsilon * \sigma * T^4 \quad (2.1)$$

Hierbei ist  $\sigma$  die Stefan-Boltzmann-Konstante ( $5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$ ),  $T$  die Strahlungstemperatur und  $\epsilon$  die Emissivität der Erdoberfläche. Gleichung 2.2 stellt die Bilanz der drei genannten Strahlungsarten dar.

$$F_{\text{netto}}^{\text{Boden}} = \sum_{1\text{Tag}} F_{\text{solar}}^{\downarrow} + F_{\text{terr.}}^{\downarrow} - F_{\text{therm.}}^{\uparrow} \quad (2.2)$$

Für den Beitrag der Solarstrahlung zur Gesamtbilanz wurde eine Albedo der Wasseroberfläche von 10 % angenommen (vgl. DWD (1987)). Die thermische Abstrahlung wird nach folgender vereinfachenden Annahme ermittelt: Maßgeblich für die Emission von Wärmestrahlung ist die Skin-Temperatur der Meeresoberfläche. In dieser Arbeit soll die in 10 cm Tiefe gemessene Wassertemperatur der Kieler Förde als Näherung mit der Skin-Temperatur gleichgesetzt und in Gleichung 2.1 eingesetzt werden.

Die Wasseroberfläche soll im langwelligen Bereich als Schwarzkörper angesehen werden. Somit wird  $\epsilon$  gleich 1 angenommen.

Mit dem in Gleichung 2.2 aufgestellten Zusammenhang ist zwar die Strahlungsbilanz geschlossen, nicht jedoch die Energiebilanz. Unberücksichtigt bleiben in dieser Betrachtung die latenten und fühlbaren Wärmeflüsse sowie die horizontalen Wärmeeinträge.

Weil sich diese Arbeit auf den Bereich der Strahlung beschränken soll, bleibt Gleichung 2.2 der Ausgangspunkt der Berechnungen.

Eine Zusammenstellung der Ergebnisse ist in Tabelle 2.1 gegeben. Ab dem Herbst 2005 lagen größere Datenlücken vor, daher kann kein Minimum angegeben werden:

Jahr	Maximum	am	Minimum	am
1998	6.829	21.06.	-1.936	22.11.
1999	6.259	11.07.	-1.394	05.12.
2000: Daten lückenhaft				
2001	6.211	04.07.	-1.646	22.12.
2002	6.327	06.06.	-2.118	10.12.
2003	6.250	28.06.	-1.852	15.12.
2004	5.916	02.06.	-1.866	19.11.
2005	6.921	28.05.		

**Tabelle 2.1:** Jährliche Extrema der Bilanz aus solarer und thermischer Strahlungsflussdichte, Angaben in  $\frac{\text{W}\cdot\text{h}}{\text{m}^2}$

Im weiteren sollen einige Bilanzextrema und die zugehörigen synoptischen Situationen näher untersucht werden.

## 2.1 Bilanzmaxima und zugehörige Wetterlagen

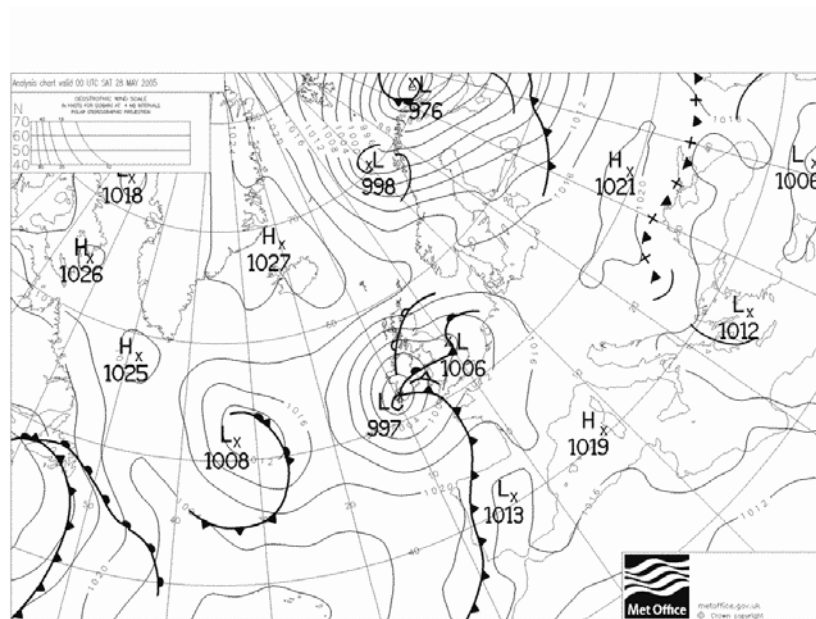
### 2.1.1 28.05.2005: fröhsommerliche Hochdrucklage

Am 28.05.2005 wurde mit  $6.921 \frac{\text{W}\cdot\text{h}}{\text{m}^2}$  das Maximum aller Tageswerte der Strahlungsbilanzen im gesamten Messzeitraum erreicht. Wie aus der Bodendruckkarte für 0 Uhr dieses Tages (Abbildung 2.1) zu erahnen ist, konnte die Sonne aufgrund fehlender fronthafter Bewölkung fast über die gesamte mögliche Zeitdauer (16 Stunden, 39 Minuten) auf die Erdoberfläche einstrahlen. In Kiel-Holtenau wurden bezüglich Wetter und Temperatur folgende Beobachtungen gemeldet:

Uhrzeit (UTC)	Bewölkung	Temperatur (C)
0:00		16,1
3:00	2/8 ac, ci	16,6
6:00	1/8 ac, ci	20,1
9:00		27,0
12:00		31,7
15:00	1/8 cu, ci	31,3
18:00	1/8 ac, ci	22,5
21:00	1/8 sc, ac, ci	15,1

**Tabelle 2.2:** Synoptische Daten der Wetterstation Kiel-Holtenau am 28.05.2005

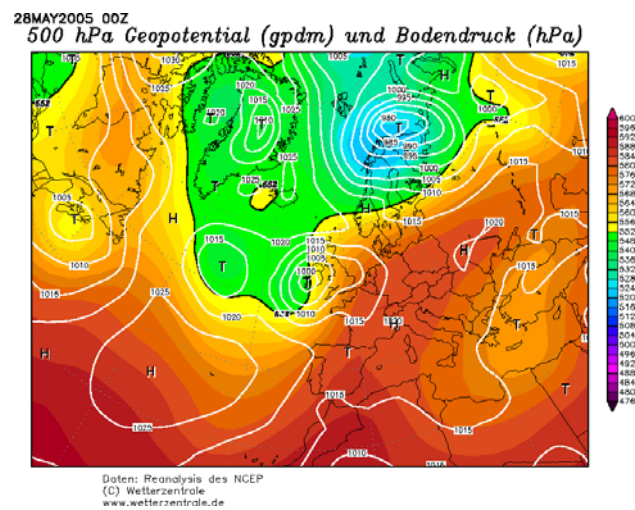
Neben dem extremen Strahlungsgewinn im solaren Spektralbereich war die langwellige Strahlungsbilanz fast ausgeglichen, wie Tabelle 2.3 zeigt. In den Abbildungen 2.1 und 2.3 ist die Bodendruckverteilung mit Fronten dargestellt.



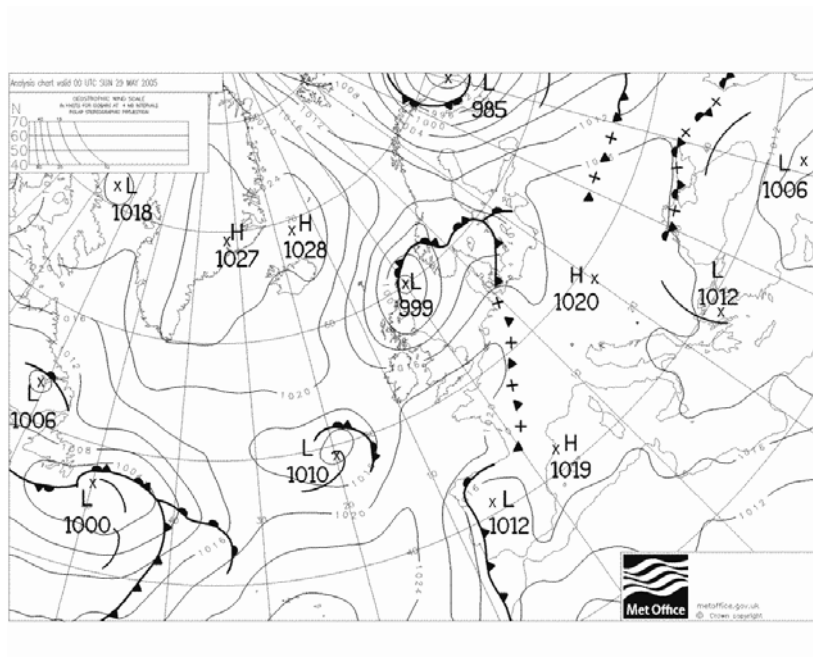
**Abbildung 2.1:** Wetterlage am 28.05.2005 um 0 Uhr UTC. Alle Bodenanalysen nach Wetterzentrale (2006a)

$F_{\text{solar}}^{\downarrow}$	$F_{\text{terr.}}^{\downarrow}$	$F_{\text{therm.}}^{\uparrow}$
6.721	9.352	9.151

**Tabelle 2.3:** Aufschlüsselung der Strahlungsbilanz des 28.05.2005, Angaben in  $\frac{\text{W}\cdot\text{h}}{\text{m}^2}$



**Abbildung 2.2:** Bodendruck- und 500 hPa-Geopotenzial-Reanalyse für den 28.05.2005. Alle Reanalyse-Karten nach Wetterzentrale (2006b)



**Abbildung 2.3:** Wetterlage am 29.05.2005 um 0 Uhr UTC

Trotz der Annäherung einer sich in der Nacht zum 29.05. bereits auflösenden Kaltfront (vgl. Abbildung 2.3) hielten sich nur wenige Wolken, sodass kein signifikantes Wetter auftrat. Die Höhenwetterkarte (Abbildung 2.2) lässt auf eine andauernde Warmluftadvektion mit westlicher Strömung im 500 hPa-Niveau schließen, was sich im relativ hohen

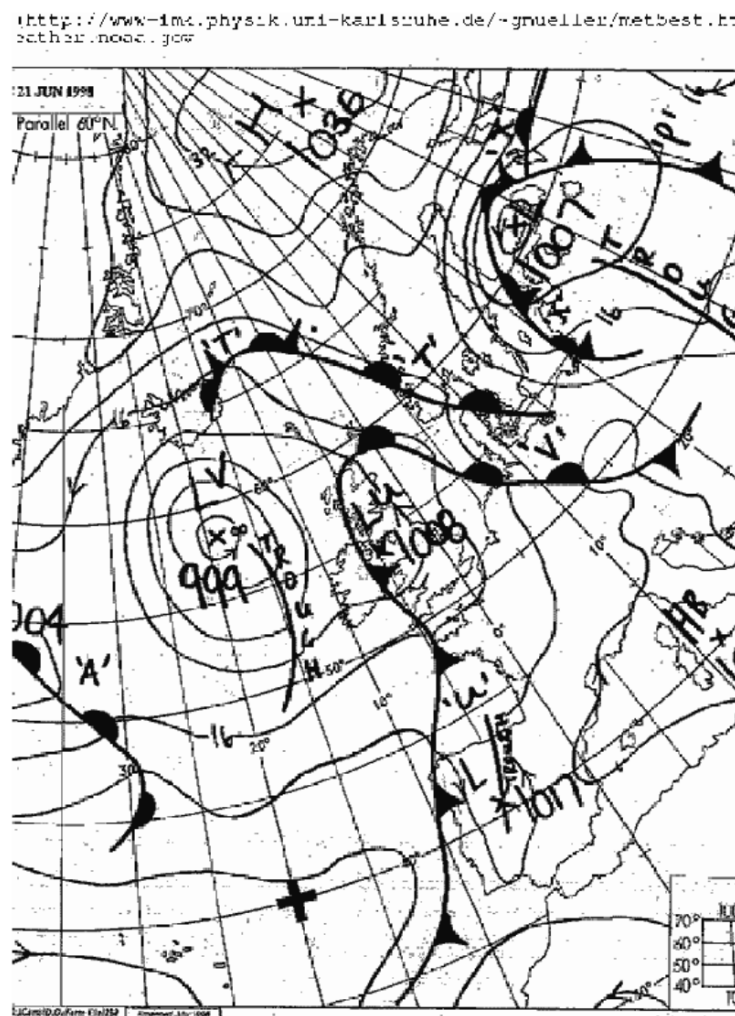


Wert für  $F_{\text{terr.}}^{\downarrow}$  in Tabelle 2.3 widerspiegelt. Am Boden herrschte bei geringen Windgeschwindigkeiten aus Süd bis Südost der Einfluss von trockener und heißer Kontinental-luft vor, die an der Westflanke eines sich Richtung Ukraine zurückziehenden Hochs nach Norddeutschland strömte.

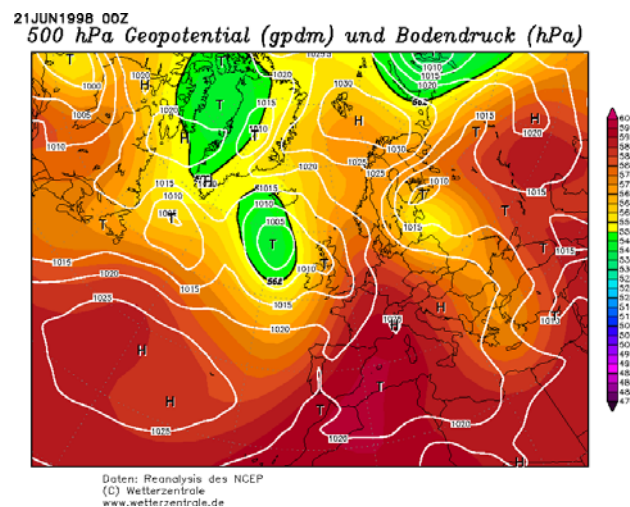
### 2.1.2 21.06.1998: fröhsommerliche Südlage

$F_{\text{solar}}^{\downarrow}$	$F_{\text{terr.}}^{\downarrow}$	$F_{\text{therm.}}^{\uparrow}$
6.571	9.870	9.612

**Tabelle 2.4:** Aufschlüsselung der Strahlungsbilanz des 21.06.1998, Angaben in  $\frac{\text{W}\cdot\text{h}}{\text{m}^2}$



**Abbildung 2.4:** Wetterlage am 21.06.1998 um 0 Uhr UTC



**Abbildung 2.5:** Bodendruck- und 500 hPa-Geopotenzial-Reanalyse für den 21.06.1998

Die Strahlungsbilanz lässt sich gemäß Tabelle 2.4 in ihre Beiträge aufspalten. Es liegt, wie aus den Bodendruckkarten 2.4 und 2.6 ersichtlich wird, eine mit der im vorherigen Beispiel vergleichbare Wetterlage vor: An der Vorderseite eines von Westen aufziehenden Tiefs wird mit südlichen bis östlichen Bodenwinden Kontinentalluft herangeführt. Der Durchzug einer Warmfront im Laufe des 21.06.1998 vermochte die Tagessumme der solaren Strahlungsflussdichte zwar geringer zu halten als am 28.05.2005. Die Summe der thermischen Gegenstrahlung lag jedoch (vermutlich infolge der Warmfrontbewölkung) um über  $500 \frac{\text{W}\cdot\text{h}}{\text{m}^2}$  über der des 28.05.2005. Leider ist es nicht gelungen, diesen Sachverhalt mittels der Synop-Daten aus Kiel-Holtenau zu untermauern, weil der von diesen abgedeckte Zeitraum erst 1999 beginnt (vgl. Einleitung). An dieser Stelle soll das Wettergeschehen auf der Grundlage von synoptischen Erfahrungen rekonstruiert werden. In der Höhe herrscht der Einfluss eines um 0 Uhr UTC über Westdeutschland liegenden Rückens vor, der mit Warmluftadvektion im Bodenniveau einhergeht. Auf dem Dach des damaligen Instituts für Meereskunde wurde eine Maximaltemperatur von 26 Grad Celsius gemessen (vgl. vorliegende meteorologische Daten). Die Niederschlagssumme blieb gleich Null, entsprechend verlief der Warmfrontdurchzug ohne Wettererscheinungen. Zu erwähnen ist, dass die Summe der thermischen Abstrahlung höher liegt als im Falle des 28.05.2005. Dies mag eine Folge der geringfügig höheren Nachttemperatur sein (Minimum bei 15,9 Grad Celsius). Wegen fehlender Bewölkungsangaben kann die Ursache nicht näher geklärt werden.

(<http://www-imk.physik.uni-karlsruhe.de/~gmueeller/metbest.h>  
[weather.noaa.gov](http://weather.noaa.gov))

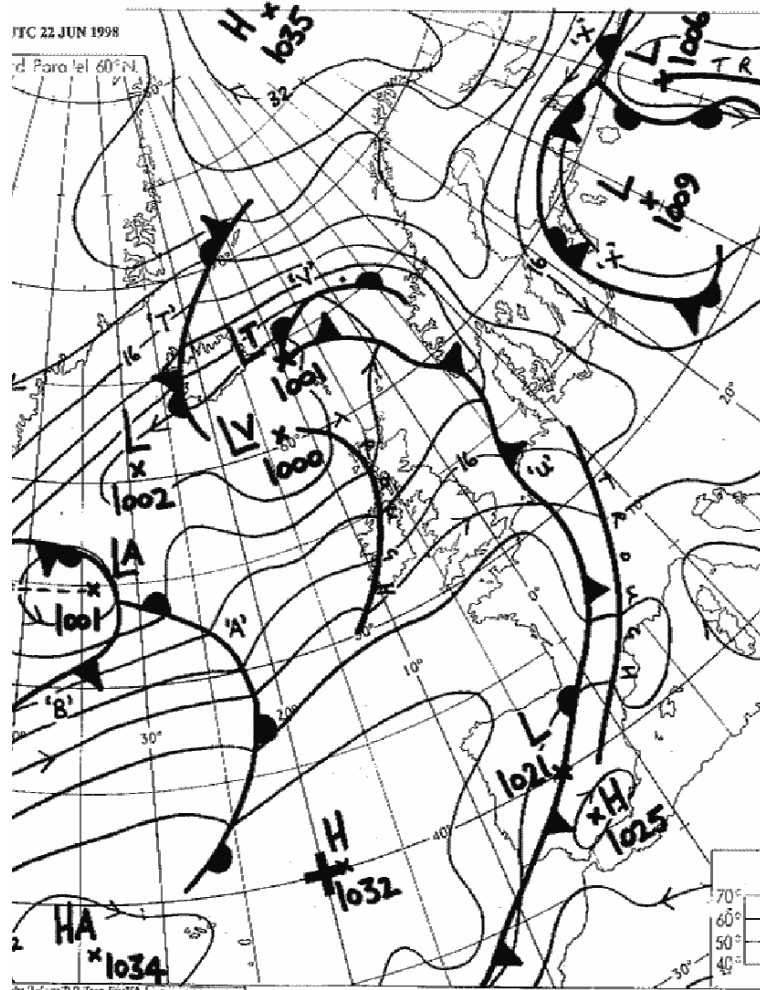


Abbildung 2.6: Wetterlage am 22.06.1998 um 0 Uhr UTC

## 2.2 Bilanzminima und zugehörige Wetterlagen

### 2.2.1 13.12.2002: frühwinterliche Hochdrucklage

Am 13.12.2002 erreichte die Bilanz aus den drei hier behandelten Strahlungsflussdichten mit  $-1970 \frac{\text{W}\cdot\text{h}}{\text{m}^2}$  einen stark negativen Bilanzwert. Wie Tabelle 2.5 zeigt, spielte neben den geringen Tagessummen der solaren und langwelligen Strahlungsflussdichte die thermische Abstrahlung die wesentliche Rolle für den Netto-Strahlungsenergieverlust an jenem Tage:

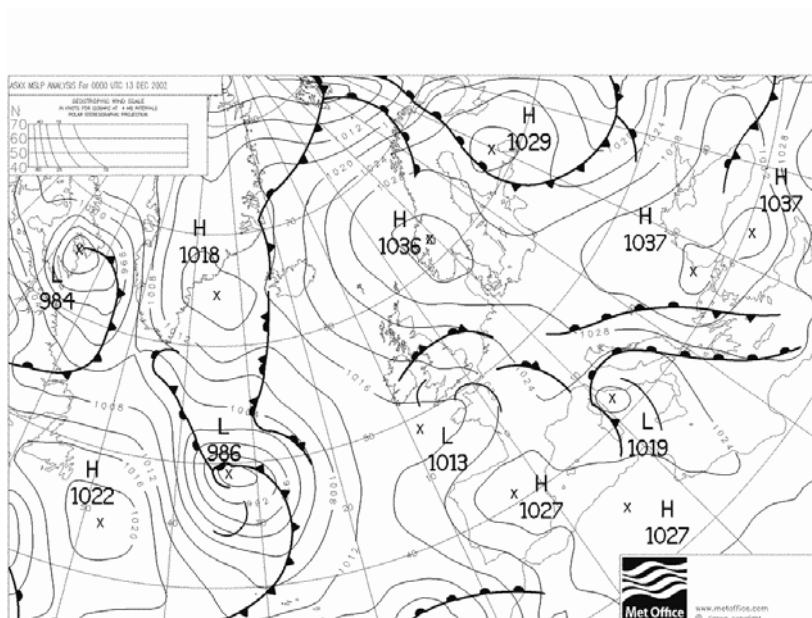
$F_{\text{solar}}^{\downarrow}$	$F_{\text{terr.}}^{\downarrow}$	$F_{\text{therm.}}^{\uparrow}$
704	5.235	7.908

**Tabelle 2.5:** Aufschlüsselung der Strahlungsbilanz des 13.12.2002, Angaben in  $\frac{\text{W}\cdot\text{h}}{\text{m}^2}$

Tabelle 2.6 verdeutlicht die relativ klare winterliche Witterung am 13.12.2002. Nur gelegentlich wurde der Himmel durch tiefe Wolken oder Dunst getrübt. Es fehlen somit die nötigen Quellen für Gegenstrahlung aus dem Halbraum. Trotz der niedrigen Temperaturen an diesem Eistag erreichte die thermische Abstrahlung Werte, die groß genug waren, um für ein Minimum in der langfristigen Zeitreihe der Strahlungsbilanzen zu sorgen.

Uhrzeit (UTC)	Bewölkung	Temperatur (C)
0:00		-5,2
3:00	Dunst	-4,5
6:00	Dunst	-4,4
9:00	Dunst	-4,1
12:00	trockener Dunst, 1/8 sc	-1,1
15:00	1/8 sc	-1,6
18:00		-2,4
21:00		-3,8

**Tabelle 2.6:** Synoptische Daten der Wetterstation Kiel-Holtenau am 13.12.2002



**Abbildung 2.7:** Wetterlage am 13.12.2002 um 0 Uhr UTC

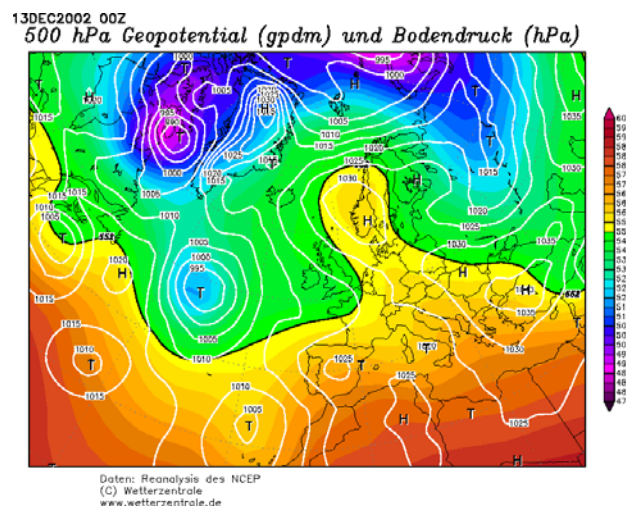


Abbildung 2.8: Bodendruck- und 500 hPa-Geopotenzial-Reanalyse für den 13.12.2002

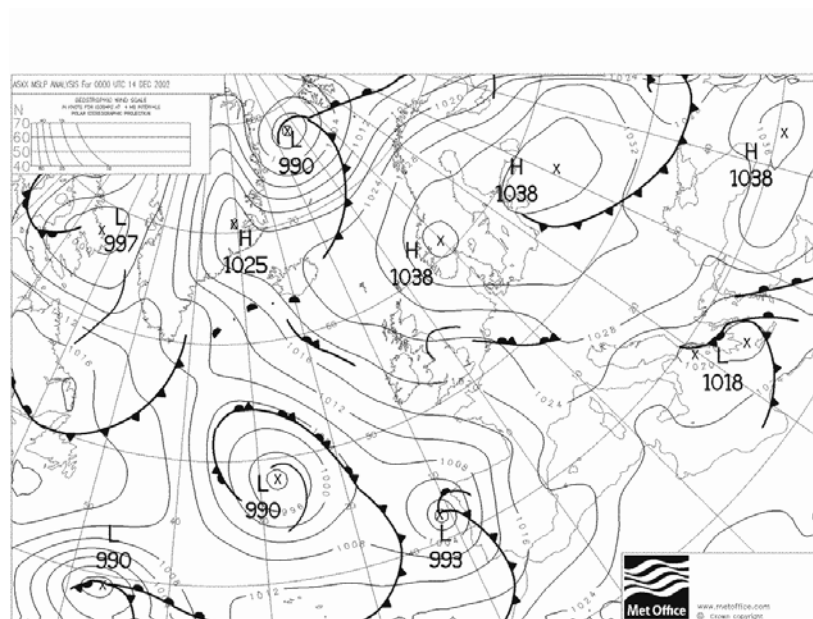


Abbildung 2.9: Wetterlage am 14.12.2002 um 0 Uhr UTC

Ursache für die in Tabelle 2.5 zusammengestellten Strahlungsenergiedichten war eine aus Abbildung 2.7 und 2.9 ersichtliche frühwinterliche Wetterlage, die von einem beständigen Hochdruckgebiet über Skandinavien geprägt war. An der Südwestseite dieses Hochs, welches (vgl. Abbildung 2.8) auch im 500 hPa-Niveau gut ausgeprägt war, ge-

langte trockene Kontinentalluft nach Norddeutschland. Eine ähnliche Bodenwetterlage lag zwar am Tage des absoluten Bilanzmaximums am 28.05.2005 vor. Allerdings unterscheiden sich die Beiträge zur Strahlungsbilanz an beiden Tagen grundlegend.

In einem stabilen winterlichen Hoch kühlt die Luft in der Regel von Tag zu Tag etwas aus. Die Tageslänge liegt in den Wintermonaten deutlich unter 12 Stunden, so dass solare Einstrahlung auch im unbewölkten Fall nur kleine Tagessummen annehmen kann und die Zeitdauer der thermischen Abstrahlung entschieden länger ist als die potentielle Sonnenscheindauer. Im Falle des 13. Dezember 2002 betrug die Tageslänge nur 7 Stunden und 24 Minuten und lag damit nur knapp über dem jährlichen Minimum. Auf diese Weise konnte die Temperatur der für Kiel maßgeblichen Luftmasse unter den Gefrierpunkt fallen. Die Strahlungstemperatur des Himmels war demnach so niedrig, dass die Gegenstrahlung nur mit einem geringen Wert in die Bilanz einging.

### 2.2.2 15.12.2003: frühwinterliche Nordwestlage

Die Tagessumme der solaren Einstrahlung am 15.12.2003 lag unter der des 13.12.2002. Im terrestrischen Spektralbereich erlangte die Erdoberfläche eine größere Tagessumme der Strahlungsflussdichte. Die Betrachtung der in Kiel-Holtenau gemessenen Temperaturen in Tabelle 2.8 soll im Zusammenhang mit der Wetterlage im folgenden den (verglichen mit dem 13.12.2002) erhöhten Betrag der thermischen Abstrahlung klären.

$F_{\text{solar}}^{\downarrow}$	$F_{\text{terr.}}^{\downarrow}$	$F_{\text{therm.}}^{\uparrow}$
570	5.846	8.308

**Tabelle 2.7:** Aufschlüsselung der Strahlungsbilanz des 15.12.2003, Angaben in  $\frac{\text{W}\cdot\text{h}}{\text{m}^2}$

Das Wetter des 15.12.2003 war gekennzeichnet durch eine starke nordwestliche Bodenströmung auf der Rückseite eines über der Ostsee liegenden Tiefs. Am Vortag war eine markante Kaltfront aus Norden über Norddeutschland hinweggezogen. Dahinter erfolgte die Zufuhr einer polaren und damit kühlen Luftmasse. Diese ist häufig mit wechselhaftem Schauerwetter verbunden, das in den Wintermonaten auch Schneeschauer hervorbringen kann.

Uhrzeit (UTC)	Bewölkung	Temperatur (C)
0:00	1/8 cu	1,3
3:00		2,0
6:00	4/8 cu, sc	1,6
9:00	4/8 sc	0,2
12:00	2/8 cu, sc, ac, ci	3,2
15:00	2/8 cu, ac	2,6
18:00	1/8 cu	2,1
21:00		2,4

**Tabelle 2.8:** Synoptische Daten der Wetterstation Kiel-Holtenau am 15.12.2003

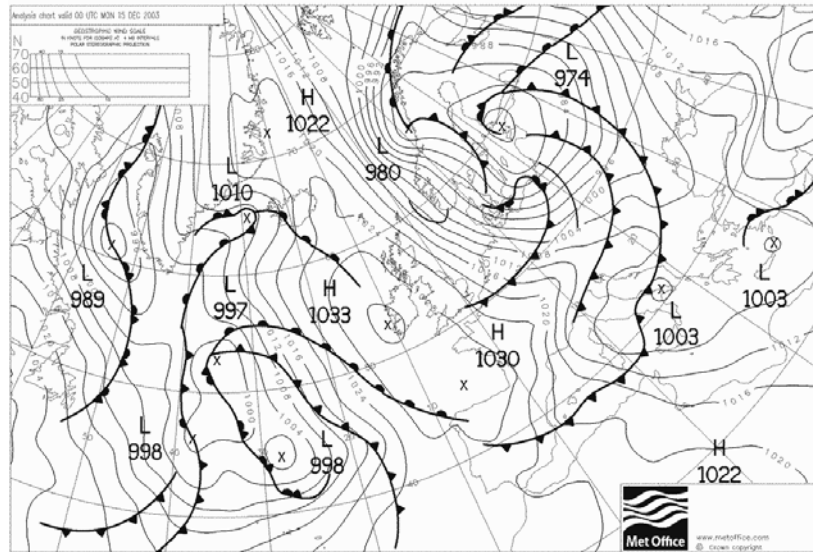


Abbildung 2.10: Wetterlage am 15.12.2003 um 0 Uhr UTC

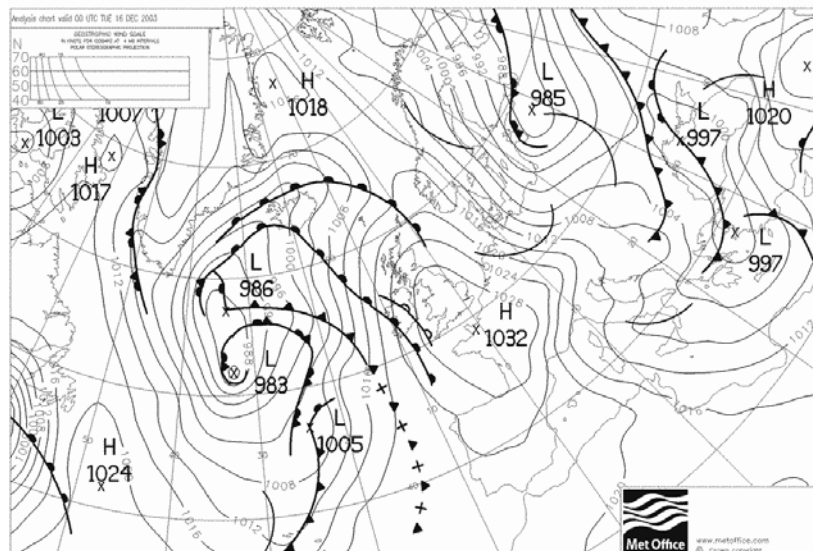


Abbildung 2.11: Wetterlage am 16.12.2003 um 0 Uhr UTC

Aus den in dreistündigen Intervallen vorliegenden Wetterbeobachtungsdaten geht aber

kein Niederschlag hervor. Bis auf den Vormittag, an dem der Himmel zur Hälfte durch tiefe Wolken bedeckt ist, hält sich nur lockere Bewölkung, überwiegend im tiefen Niveau. Offenbar fehlte der Polarluft die für hochreichende Konvektion notwendige Labilität. Im Vergleich zum fast unbewölkten 13.12.2002 war die Tagessumme der solaren Einstrahlung mit  $570 \frac{\text{W}\cdot\text{h}}{\text{m}^2}$  geringer, weil besonders in den Mittagsstunden Wolken vorhanden waren. Die infrarote Gegenstrahlung nahm wegen der tiefen Wolken und wegen der durchgehend positiven Temperaturen einen höheren Wert der Tagessumme an. Letzteres ist der Grund dafür, warum die thermische Abstrahlung den Betrag des Beispiels aus dem vorangegangenen Jahr um  $400 \frac{\text{W}\cdot\text{h}}{\text{m}^2}$  übersteigt.

Insgesamt lassen sich die Bilanzextrema auf folgende Voraussetzungen zurückführen:

Maxima werden besonders an Frühsommertagen mit geringer Bewölkung erreicht. In diesen Fällen ist die Tageslänge und somit die solare Einstrahlung sehr groß. Dagegen kann die thermische Abstrahlung diesen Strahlungsgewinn im sichtbaren Bereich nicht kompensieren, weil die Wassertemperatur ihr Maximum noch nicht erreicht hat. Die Minima zeichnen sich durch frühwinterliche Wetterlagen mit wenigen Wolken aus. Weil die Tageslänge ihr Minimum im Dezember hat und aus dem Halbraum wenig Gegenstrahlung empfangen wird, sorgt die noch relativ warme Wasseroberfläche für eine vergleichbar hohe thermische Abstrahlung.

## 2.3 Jahresgang der täglichen Strahlungsbilanzen: Das Beispiel 2003

Wegen des annähernd lückenlosen Bestandes an Ceilometerdaten und sonstigen synoptischen Messwerten dient im folgenden das Jahr 2003 als Beispiel für den Verlauf der einzelnen Strahlungsbilanzbeiträge über ein ganzes Jahr.

Graphik 2.12 zeigt deutlich den Jahresgang in der solaren Strahlungsflussdichte. Die Tagessummen der solaren Einstrahlung variieren um einen Faktor von ca. 200 zwischen  $38 \frac{\text{W}\cdot\text{h}}{\text{m}^2}$  (am 4.12.) und  $7.368 \frac{\text{W}\cdot\text{h}}{\text{m}^2}$  (am 27.06.). Nicht so drastisch ausgeprägt ist die jährliche Schwankung der Tagessummen der thermischen Strahlung (sowohl Gegen- als auch Abstrahlung). Die Gegenstrahlung erreicht im Winter Minima um  $5.000 \frac{\text{W}\cdot\text{h}}{\text{m}^2}$  und im Sommer Maxima von fast  $10.000 \frac{\text{W}\cdot\text{h}}{\text{m}^2}$ . Die aus der Wassertemperatur errechnete thermische Abstrahlung liegt tendenziell über der Gegenstrahlung. In den Herbstmonaten kann die Differenz mehr als  $3.000 \frac{\text{W}\cdot\text{h}}{\text{m}^2}$  betragen. Ursache ist die im Vergleich zur umgebenden Luft verzögerte Abkühlung der Wasseroberfläche. Es lässt sich feststellen, dass die beiden langwelligen Bilanzbeiträge während des gesamten Jahres, besonders aber in den solarstrahlungsarmen Wintermonaten betragsmäßig über den Tagessummen der solaren Einstrahlung liegen. Allerdings heben sich terrestrische Gegenstrahlung und thermische Abstrahlung bei der Bilanzbildung fast weg. Somit wird der Jahresgang der Gesamtstrahlungsbilanz im wesentlichen von der kurzwelligen Strahlung bestimmt.

Im Anhang werden die Strahlungsbilanzen der weiteren Jahre zwischen 1998 und 2005 (mit Ausnahme des Jahres 2000) dargestellt.



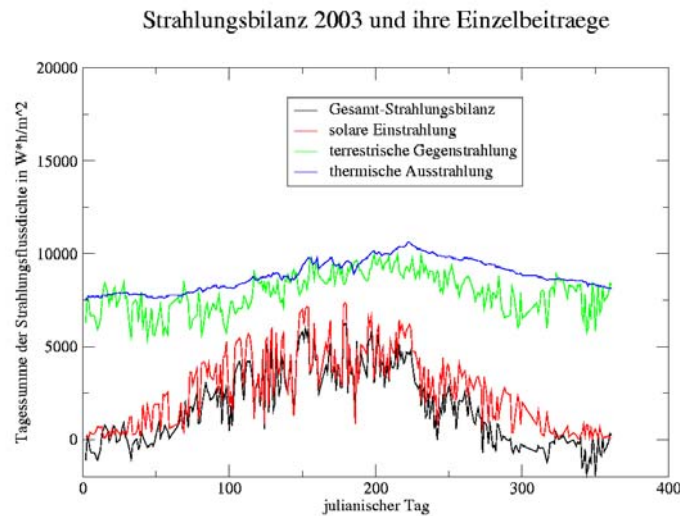


Abbildung 2.12: Jahresverlauf der Beiträge zur Strahlungsbilanz im Jahr 2003

## 2.4 Tagessummen der solaren Einstrahlung

Um die Variabilität der solaren Strahlungsflussdichte innerhalb des Messzeitraums zu veranschaulichen, sind in Tabelle 2.9 die Maxima und Minima der Tagessummen der solaren Strahlungsflussdichte dargestellt. Die Albedo des Wassers von 10 %, die bei der Bilanzberechnung im vorherigen Abschnitt berücksichtigt wurde, entfällt im folgenden, weil nur die einfallende Solarstrahlung gezählt werden soll.

Maxima	
09.07.1999	8.394
02.06.2004	8.330
Minima	
04.12.2003	42
06.12.2002	17

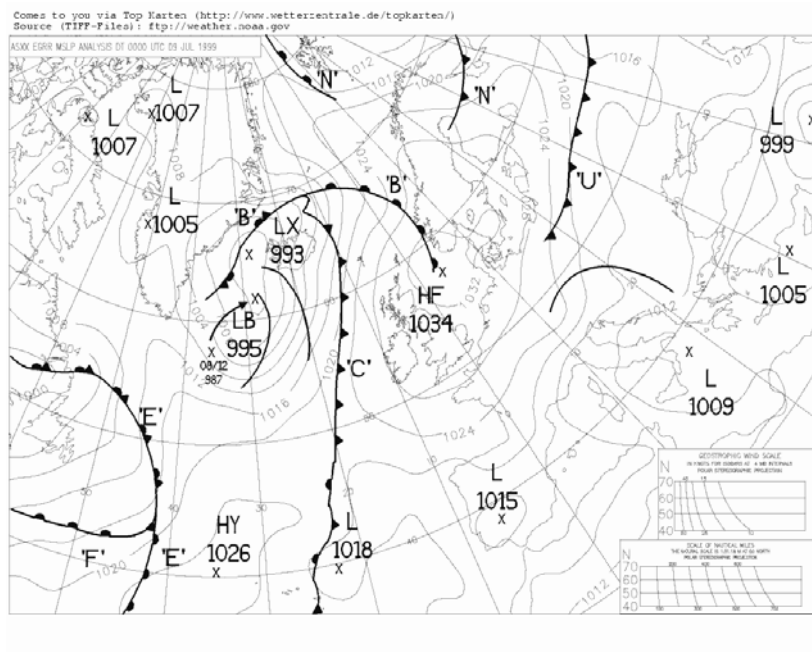
Tabelle 2.9: Extrema der Tagessummen der solaren Strahlungsflussdichte, Angaben in  $\frac{\text{W} \cdot \text{h}}{\text{m}^2}$

### 2.4.1 Maximum der Tagessummen: 09.07.1999

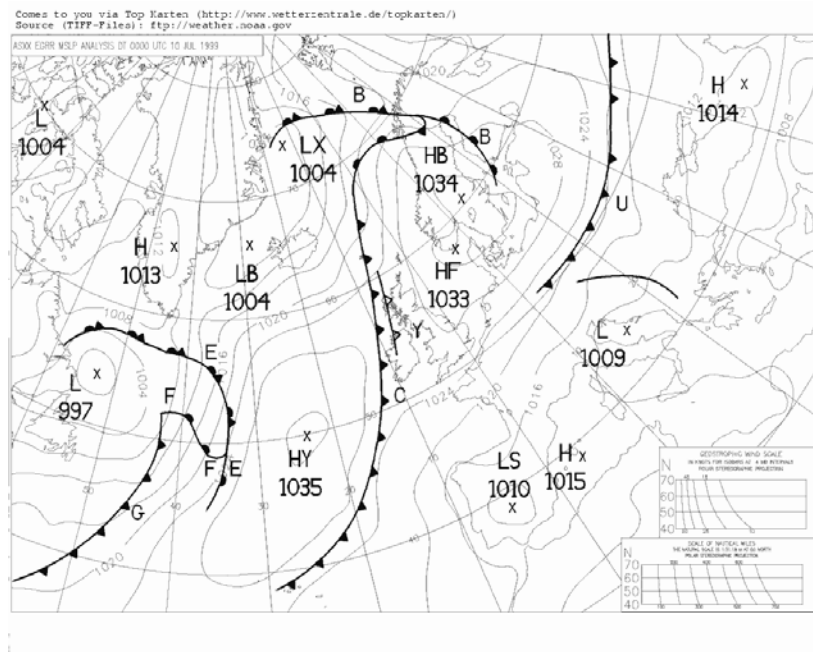
Am 09.07.1999 herrschten ideale Bedingungen vor, so dass die Sonnenstrahlung zwischen Auf- und Untergang ungehindert auf die Erdoberfläche einwirken konnte.

Uhrzeit (UTC)	Bewölkung	Wetter
0:00		16,1
3:00	2/8 ac, ci	16,6
6:00	1/8 ac, ci	20,1
9:00		27,0
12:00		31,7
15:00	1/8 cu, ci	31,3
18:00	1/8 ac, ci	22,5
21:00	1/8 sc, ac, ci	15,1

**Tabelle 2.10:** Synoptische Daten der Wetterstation Kiel-Holtenau am 09.07.1999



**Abbildung 2.13:** Wetterlage am 09.07.1999 um 0 Uhr UTC



**Abbildung 2.14:** Wetterlage am 10.07.1999 um 0 Uhr UTC

Ein Hochdruckgebiet mit Zentrum über der Nordsee hielt Wolken weitgehend aus dem Bereich Norddeutschland fern. In Verbindung mit der Tageslänge von 16 Stunden und 53 Minuten (wie alle Tageslängenangaben in dieser Arbeit berechnet nach Wetterzentrale (2006c)) ergab sich, über den Tag aufsummiert, das Maximum der Tagessummen der solaren Strahlungsflussdichte. Auch für diesen Fall sind keine Synop-Meldungen aus Kiel-Holtenau verfügbar (der Bestand aus dem Jahr 1999 ist lückenhaft). Wegen der charakteristischen Hochdrucklage fällt die Klärung der synoptischen Zusammenhänge allerdings nicht sonderlich schwer.

#### 2.4.2 Minimum der Tagessummen: 06.12.2002

Uhrzeit (UTC)	Bewölkung	Wetter
0:00	7/8 sc	Regen/Sprühregen
3:00	7/8 st	nach Regen
6:00	7/8 st	Regen / Sprühregen
9:00	7/8 st	Regen / Sprühregen
12:00	7/8 sc	nach Regen
15:00	7/8 sc	
18:00	7/8 sc	
21:00	7/8 sc	

**Tabelle 2.11:** Synoptische Daten der Wetterstation Kiel-Holtenau am 06.12.2002

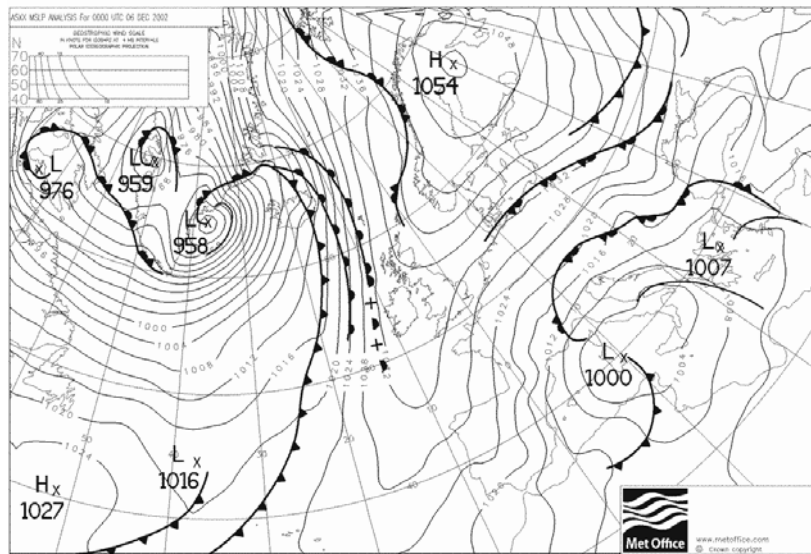


Abbildung 2.15: Wetterlage am 06.12.2002 um 0 Uhr UTC

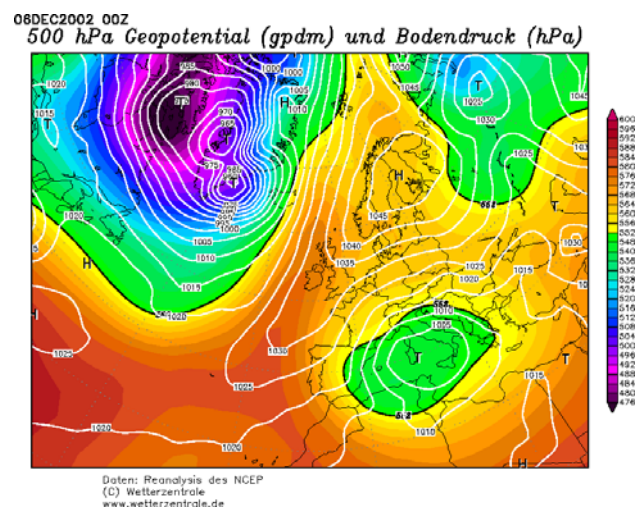
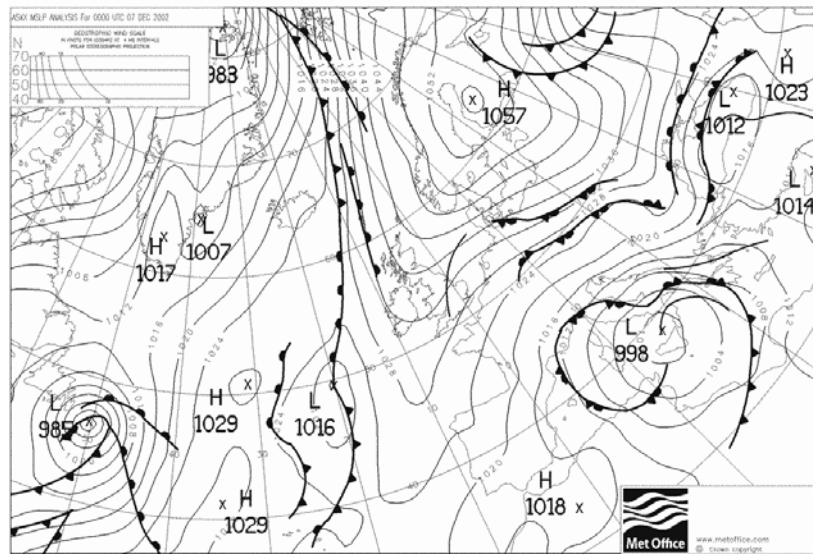


Abbildung 2.16: Bodendruck- und 500 hPa-Geopotenzial-Reanalyse für den 06.12.2002



**Abbildung 2.17:** Wetterlage am 07.12.2002 um 0 Uhr UTC

Die Tageslänge am 6.12.2002 betrug 7 Stunden und 35 Minuten. Allerdings unterlag jegliche Solarstrahlung der Extinktion durch die fast geschlossene tiefe Wolkenschicht. Wie aus Abbildung 2.15 hervorgeht, hielt sich am 6.12.2002 eine als Okklusion bezeichnete Bodenfront über Norddeutschland. Diese blieb wegen des in der Höhe kaum vorhandenen Windes, der sonst für Verlagerung der Fronten verantwortlich ist, noch bis zum nächsten Tag annähernd ortsfest (die Geopotenzial-Verteilung in Abbildung 2.16 weist nur schwache Gradienten über Mitteleuropa auf), schwächte sich dabei aber langsam ab (vgl. Abbildung 2.17). Entsprechend konnte bis in die Mittagsstunden des 6.12.2002 aus tiefer stratiformer Bewölkung länger anhaltender, leichter Niederschlag fallen, was für einen gewissen Warmfrontcharakter der Okklusion spricht.

Es ist intuitiv klar, dass eine große Tageslänge, einhergehend mit geringer (oder fehlender) Bewölkung, für Maxima in der über einen Tag summierten solaren Strahlungsflussdichte verantwortlich sein muss. Dies ist meist in sommerlichen Hochdruckgebieten gegeben. Umgekehrt wirkt sich eine persistente tiefe Wolkenschicht an Tagen mit geringer potentieller Sonnenscheindauer stark negativ auf die Tagessumme der Solarstrahlung aus. Als typische synoptische Situationen kommen winterliche Nebel- oder Schleiflagen in Frage.



## Kapitel 3

# Parametrisierung der langwelligen Gegenstrahlung

In diesem Kapitel soll die aus dem Halbraum einfallende langwellige Gegenstrahlung aus anderen meteorologischen Größen bestimmt werden. Zunächst soll der vorhandene Datenbestand genutzt werden, um in einem ersten Ansatz zu prüfen, ob die langwellige Strahlungsflussdichte aus nur drei Parametern (Bodentemperatur, Wolkenhöhe und Bedeckungsgrad), die leicht messbar sind, ausreichend genau berechnet werden kann. Es soll im weiteren bei der Benutzung der Parametrisierung nach Josey et al. (2003) die Luftfeuchte zu den Eingangsgrößen hinzugezogen werden, sodass ein genauerer Zusammenhang zwischen der terrestrischen Strahlungsflussdichte, den Ceilometermessungen und dem Zustand der bodennahen Luftmasse hergestellt wird.

### 3.1 Erster Ansatz: Berechnung der langwelligen Gegenstrahlung aus der Wolkenbasistemperatur

#### 3.1.1 Voraussetzungen

In diesem Abschnitt soll der Versuch unternommen werden, aus der in 35 m Höhe gemessenen Temperatur und der mit Hilfe des Ceilometers ermittelten Wolkenunterkantenhöhe  $z_b$  die Temperatur der Wolkenbasis zu errechnen. Dabei werden folgende Näherungen und Konventionen zu Grunde gelegt:

1. Es wird ohne Rücksicht auf die Wolkenhöhe und -gattung von einem trockenadiabatischen Temperaturgradienten  $\Gamma_d (= 1 \frac{\text{K}}{100\text{m}})$  unterhalb der Wolkenbasis

$$T(z) = T(\text{Boden}) - \Gamma_d * z \quad (3.1)$$

ausgegangen. Eine Fallstudie soll im weiteren klären, wie realistisch diese Annahme ist.

2. Die Wolkenbasis wird als idealer schwarzer Strahler betrachtet. Die terrestrische Strahlungsflussdichte  $F_{\text{terr.}}^{\downarrow}$  eines derartigen Objekts lässt sich nach dem Stefan-

Boltzmann-Gesetz (vgl. Gleichung 2.1) aus der Strahlungstemperatur  $T_{\text{rad}}$  folgendermaßen berechnen:

$$F_{\text{terr.}}^{\downarrow} = \sigma(T_{\text{rad}}(z_b))^4 \quad (3.2)$$

$\sigma$  ist wieder die Stefan-Boltzmann-Konstante ( $5.67 * 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}$ ).

Mit dem adiabatischen Profil schreibt sich die Strahlungsflussdichte an der Wolkenbasis wie folgt:

$$F_{\text{terr.}}^{\downarrow} = \sigma(T(\text{Boden}) - \Gamma_d * z_b)^4 \quad (3.3)$$

3. Ist der Himmel nicht vollständig bedeckt, so wird davon ausgegangen, dass der bewölkte Teil des Himmels als schwarzer Körper strahlt, während die Gegenstrahlung des unbewölkten Himmels  $F_{\text{cls}}^{\downarrow}$  als Referenzgröße erhalten wird. Damit ergibt sich bei der Berechnung der Gesamt-Strahlungsflussdichte bei drei zur Verfügung stehenden Rückstreuniveaus Gleichung 3.4. Die Rückstreuniveaus werden als Wolkenschichthöhen aufgefasst.

$$F_{\text{terr.,gesamt}}^{\downarrow} = (C_1 * F_1^{\downarrow} + C_2 * F_2^{\downarrow} + C_3 * F_3^{\downarrow}) + (1 - (C_1 + C_2 + C_3)) * F_{\text{cls}}^{\downarrow} \quad (3.4)$$

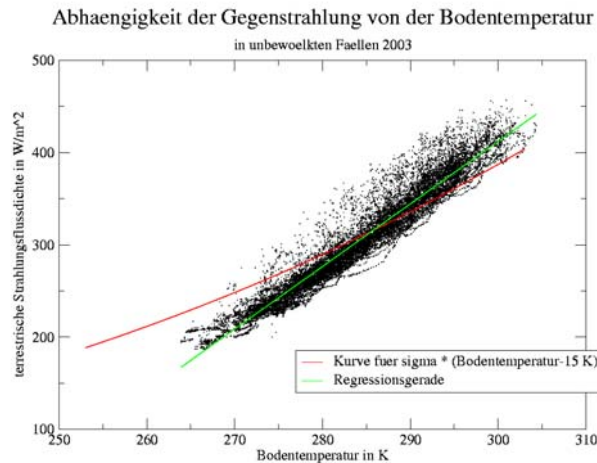
Dabei beziehen sich die Indizes auf das jeweilige Wolkenniveau. Die C-Werte sind die jeweiligen Bedeckungsgrade. Gleichung 3.4 ist jedoch fehlerbehaftet, wenn sich die drei Wolkenschichten überlappen. Eine Auseinandersetzung mit derartigen Überlappungsfällen soll im Ausblick geschehen.

Das Auftreten von mehr als einem Rückstreuniveau kann in unterschiedlichen Zusammenhängen vorkommen: Entweder ist eine tiefe Bewölkung von einer viel höheren Wolkenschicht (deutlich mehr als hundert Meter) überzogen. Dann ist entsprechend dem Stefan-Boltzmann-Gesetz (Gleichung 2.1) wegen der  $T^4$ -Abhängigkeit der Strahlungsflussdichte selbst bei geringen Differenzen der Wolkenbasistemperaturen hauptsächlich die unterste Wolkenschicht für die Gesamtemission verantwortlich. Oder beide Wolkenbasishöhen liegen eng (weniger als hundert Meter) auseinander. In diesem Fall kann von der diffusen Wolkenunterkante ein und derselben Wolke (eventuell mit fetzenartiger Basisstruktur) ausgegangen werden. Diese Erscheinung tritt im Datensatz besonders bei tiefen Wolken (unter 1 km) auf.

Die rechte Seite von Gleichung 3.4 reduziert sich für die durchgeführten Berechnungen der terrestrischen Strahlungsflussdichte auf den ersten Term und den Referenzwert für unbewölkten Himmel.

$$F_{\text{terr.,gesamt}}^{\downarrow} = C_1 * F_1^{\downarrow} + (1 - C_1) * F_{\text{cls}}^{\downarrow} \quad (3.5)$$





**Abbildung 3.1:** Streudiagramm: Terrestrische Strahlungsflussdichte in Abhängigkeit von der Bodentemperatur mit linearer Regression

Um  $F_{cls}^{\downarrow}$  abzuschätzen, wurde die terrestrische Strahlungsflussdichte gegen die Bodentemperatur  $T(\text{Boden})$  bei unbewölktem Himmel aufgetragen. Es liegen die Messwerte des Jahres 2003 zugrunde. Im Streudiagramm 3.1 wurde eine lineare Regression durchgeführt. Die Gleichung 3.6 der Regressionsgeraden soll wegen der hohen Korrelation von 0,966 als Bestimmungsgleichung für  $F_{cls}^{\downarrow}$  dienen:

$$F_{cls}^{\downarrow} = a * T(\text{Boden}) + b \quad (3.6)$$

mit  $a = 6,7846 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$  und  $b = -1623,2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ .

In Abbildung 3.1 ist zusätzlich eine Kurve dargestellt, die sich aus dem Stefan-Boltzmann-Gesetz ergibt, wenn als Strahlungstemperatur die willkürlich um 15 K verminderte Bodentemperatur gewählt wird. Wegen der im gezeigten Temperaturintervall sehr geringen Krümmung der Parabel ist die in dieser Arbeit vorgenommene lineare Regression bereits eine zufriedenstellende Näherung für die Abhängigkeit der terrestrischen Strahlungsflussdichte von der Bodentemperatur.

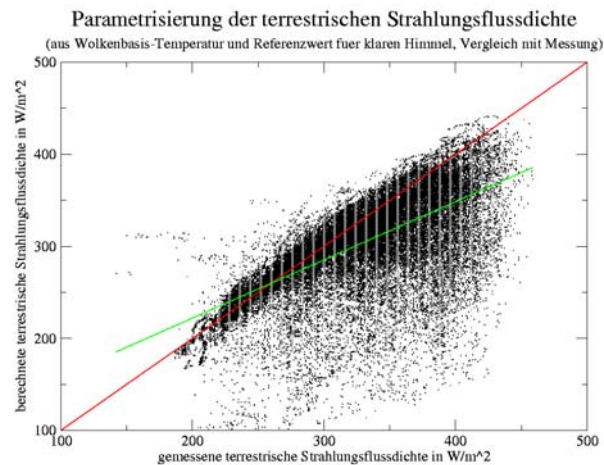
4. Der Bewölkungsgrad wird als das Verhältnis der Zahl der Messungen mit vorliegender Wolkenbasis zur Gesamtzahl der Messungen in einem 8-Minuten-Intervall angesehen, was eine grobe Abschätzung bedeutet. Dadurch können Differenzen zum beobachteten Bewölkungsgrad auftreten, weil nur der Zenit über dem Ceilometer von der Messung betroffen ist. Beispielsweise kann eine einzelne persistente Wolke im Zenit bei sonst wenig bewölktem Himmel im Messintervall einen Bedeckungsgrad nahe 1 vortäuschen.

5. Als Hilfsvariable soll für das Verhältnis aus berechneter ( $F_r^\downarrow$ ) und gemessener ( $F_m^\downarrow$ ) Gegenstrahlung die Größe  $y$  eingeführt werden.

$$y := \frac{F_r^\downarrow}{F_m^\downarrow} \quad (3.7)$$

### 3.1.2 Ergebnisse: Statistik der Gegenstrahlung über das Jahr 2003

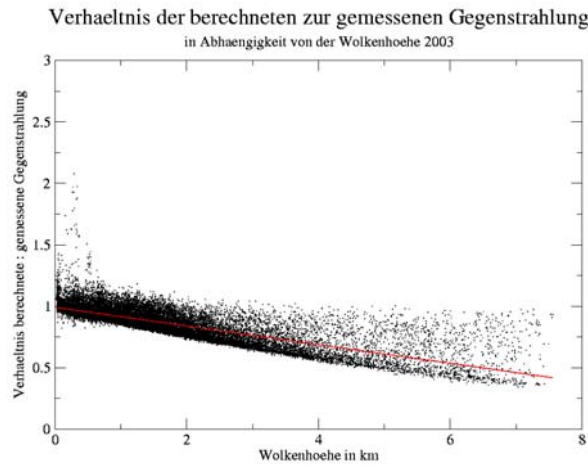
Die Berechnung wurde für das Jahr 2003 durchgeführt, in dem ein fast lückenloser Ceilometer-Datensatz vorliegt. In Graphik 3.2 wurde die nach Gleichung 3.3 parametrisierte Gegenstrahlung gegen die Messwerte aufgetragen.



**Abbildung 3.2:** Streudiagramm aus berechneter und gemessener terrestrischer Strahlungsflussdichte

Die Winkelhalbierende ist in Graphik 3.2 wie in allen folgenden Graphiken dieser Arbeit, in denen Größen gleicher Dimension gegeneinander dargestellt sind, rot gehalten. Die Korrelation beträgt 0,632. Die Mehrzahl der Punkte in Graphik 3.2 liegt unterhalb der Winkelhalbierenden. Damit wird in vielen Fällen die Strahlungsflussdichte unterschätzt. Als Ursachen kommen vor allem vier Zusammenhänge in Frage:

1. Das vertikale Temperaturprofil ist eher feucht- als trockenadiabatisch.
2. Die Strahlung des unbewölkten Himmels wird über- oder unterschätzt. Gemäß Abbildung 3.1 ist dieser Fehler eher gering.
3. Der Bedeckungsgrad aus den Ceilometermessungen ist fehlerhaft.
4. Die Wolken sind keine idealen Schwarzkörper.

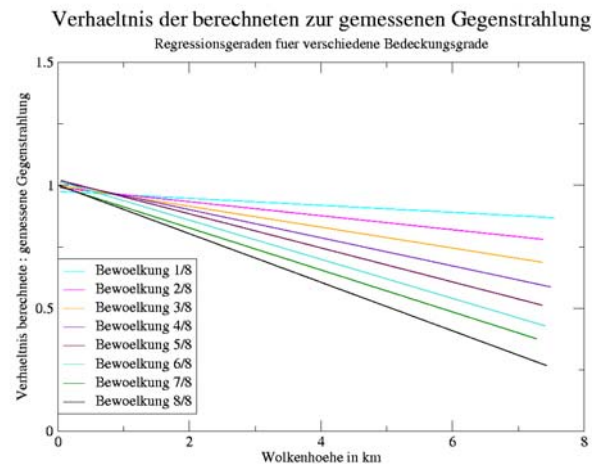


**Abbildung 3.3:** *Verhaeltnis aus berechneter und gemessener terrestrischer Strahlungsflussdichte in Abhängigkeit von der Wolkenhoehe*

Die letzten beiden Fehlerquellen sind im Rahmen dieser Arbeit nicht überprüfbar. Es soll im folgenden geklärt werden, welchen Beitrag die Annahme über die Temperaturschichtung und der Referenzterm für die Strahlung des unbewölkten Himmels zum Gesamtfehler leisten. Abbildung 3.3 stellt das Verhältnis aus berechneter und gemessener terrestrischer Strahlungsflussdichte in Abhängigkeit von der Wolkenhöhe dar.

Die in Graphik 3.3 eingezeichnete Regressionsgerade (rot) zeigt, dass für große Wolkenhöhen die Gegenstrahlung als zu gering berechnet wird. Dies hängt mit der Annahme zusammen, dass ein trockenadiabatisches Temperaturprofil unterhalb der Wolkenbasis vorliegt: Mit dieser Voraussetzung erscheinen besonders hohe Wolken zu kalt, weil der Fehler der Wolkenbasistemperatur mit der Höhe deutlich anwächst.

Aus Graphik 3.4 soll ersichtlich werden, wie groß der Beitrag des Referenztermes für unbewölkten Himmel zum Gesamtfehler ist.



**Abbildung 3.4:** Verhältnis aus berechneter und gemessener terrestrischer Strahlungsflussdichte in Abhängigkeit von der Wolkenhöhe: Regressionsgeraden für Bedeckungsgrade 1/8 bis 8/8

In Graphik 3.4 sind die Regressionsgeraden der Messwerte zusammengestellt, die in Graphik 3.3 zu ein und demselben Bedeckungsgrad zwischen 1/8 und 8/8 gehören. Erkennbar ist die Tatsache, dass die Geraden für Bedeckungsgrade nahe 8/8 eine deutlich negative Steigung haben, während das Verhältnis aus berechneter und gemessener Gegenstrahlung für kleine Bedeckungsgrade kaum mit der Wolkenhöhe abnimmt. Der Beitrag des unbewölkten Himmels ist somit eine geringere Fehlerquelle als die Abschätzung der Temperaturschichtung. Anhand der Korrelation in Abhängigkeit vom Bedeckungsgrad soll in Tabelle 3.1 dieser Zusammenhang quantifiziert werden.

Bedeckungsgrad	Korrelation
0/8	0,966
1/8	0,928
2/8	0,891
3/8	0,829
4/8	0,731
5/8	0,624
6/8	0,508
7/8	0,458
8/8	0,390

**Tabelle 3.1:** Korrelation der berechneten mit der gemessenen terrestrischen Strahlungsflussdichte in Abhängigkeit vom Bedeckungsgrad

Der erste Ansatz ist wegen des Fehlers bei der Berechnung der Wolkenbasistemperatur äußerst ungenau. Eine Fallstudie, die in einem relativ kurzen synoptischen Zeitraum

(2 Tage) einige unterschiedliche Wolkengattungen und Wettererscheinungen erfasst, soll die in diesem Abschnitt berechneten Zusammenhänge veranschaulichen und die Abweichungen in Abhängigkeit vom Himmelszustand erklären.

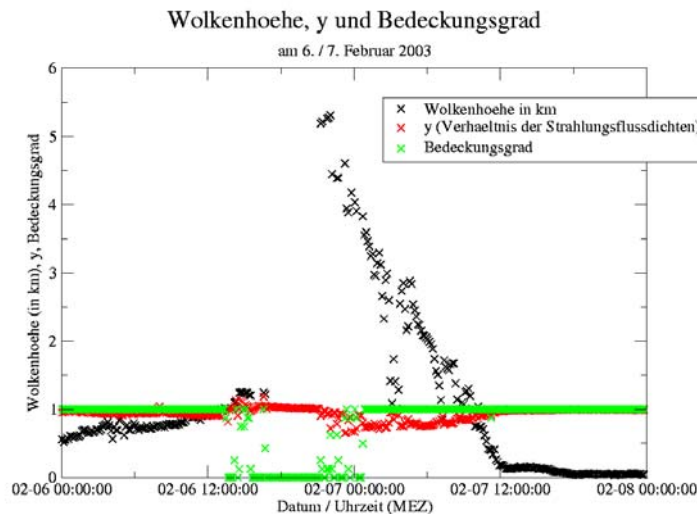
### 3.1.3 Fallstudie: Verlauf von Wolkenhöhe, Strahlungshöhe und Bedeckungsgrad am 6./7. Februar 2003

Die Wetterstation Kiel-Holtenau meldete am 6. und 7. Februar die in Tabelle 3.2 zusammengestellten Wolken- und Wettererscheinungen.

Uhrzeit	Bewölkung	Wetter
6.2., 00:00 UTC	5/8 sc	
03:00 UTC	7/8 sc	
06:00 UTC	3/8 sc	
09:00 UTC	7/8 sc	
12:00 UTC	7/8 sc	
15:00 UTC	3/8 sc	
18:00 UTC	1/8 ac, ci	
21:00 UTC	1/8 ac, ci	
7.2., 00:00 UTC	1/8 ac, ci	
03:00 UTC	3/8 sc, ac, ci	
06:00 UTC	2/8 sc, ci	Schneefall
09:00 UTC	4/8 sc, ac	Eisnadeln
12:00 UTC	7/8 st	gefrierender Regen
15:00 UTC	7/8 st	Sprühregen
18:00 UTC	7/8 st	Sprühregen
21:00 UTC	7/8 st	Sprühregen

**Tabelle 3.2:** SYNOP-Meldungen der Wetterstation Kiel-Holtenau am 6. und 7. Februar 2003

In Abbildung 3.5 ist der Verlauf der Wolkenhöhe, des Verhältnisses der Strahlungsflussdichten  $y$  sowie des Bedeckungsgrades graphisch dargestellt. Es ist darauf hinzuweisen, dass Differenzen zwischen dem Bedeckungsgrad über dem Ceilometer und der in Kiel-Holtenau beobachteten Bewölkung auftreten.



**Abbildung 3.5:** Verlauf von Wolkenhöhe,  $y$  und Bedeckungsgrad am 6. und 7. Februar 2003

Der 6. Februar beginnt mit einer Schichtwolkendecke, in der sich einzelne Lücken zeigen. Die Wolkenhöhe steigt von 0 bis 12 Uhr von 0,5 auf 1 km an; dies deckt sich mit der Angabe, dass es sich um einen Stratocumulus handelt. Über dem Ceilometer verbleibt der Bedeckungsgrad bis nach 12 Uhr allerdings dauerhaft bei 1, obwohl die Beobachtungen diesen als zwischen 3 und 5 Achtel fluktuierend ansehen. In diesem Zeitabschnitt sind gemessene und parametrisierte terrestrische Strahlungsflussdichte fast identisch.

Im Laufe des frühen Nachmittages bricht die Stratocumulus-Decke auf. Sind um 15 Uhr noch 3 Achtel Stratocumulus vorhanden, so meldet die Wetterstation Holtenau um 18 Uhr nur noch 1 Achtel Altocumulus. Die Anzahl der Ceilometermessungen mit feststellbarer Wolkenhöhe geht in den darauf folgenden Stunden deutlich zurück, so dass ab ca. 18 Uhr keine Informationen über die Wolkenbasis mehr errechnet werden.

Obwohl die Wolkenhöhe während der Auflockerung größer wird und dabei gemäß Abbildung 3.3 die terrestrische Strahlungsflussdichte tendenziell unterschätzt wird, kompensiert die Referenzstrahlungsflussdichte den Fehler, sodass  $y$  bis in den Abend bei 1 bleibt.

In der letzten Stunden des Tages nimmt der Bedeckungsgrad wieder zu. Eine Altocumulus-Decke zieht auf. Die Wolkenbasis sinkt ab etwa 21 Uhr bis weit in den Folgetag kontinuierlich von 6 km auf fast 0 km ab. Bevor sie allerdings die Höhe von 1 km unterschreitet, sind  $y$ -Werte zu beobachten, die kleiner 1 sind. Das Minimum für  $y$  liegt bei 0,5 und geht einher mit der in dieser Fallstudie maximalen gemessenen Wolkenhöhe von 6 km.

Gegen 6 Uhr schneit es bei relativ geringem Bedeckungsgrad (2 Achtel). Das Verhältnis aus berechneter und gemessener Gegenstrahlung ist kleiner als 1, während die Wolken-

basis noch höher als 2 km ist. Weil die terrestrische Strahlungsflussdichte mit der Annahme eines trockenadiabatischen Temperaturprofils unterschätzt wird, ist eine Inversion sehr wahrscheinlich. Inversive Luftschichtungen sind bei dieser stratiformen Bewölkung (4 Achtel Stratocumulus) häufig anzutreffen.

Ab 12 Uhr meldet Kiel-Holtenau Sprühregen bei einer dichten Stratusdecke. Die Wolkenhöhe liegt bei 0 km. Nun strahlen die fast aufliegenden Wolken mit derselben Temperatur wie der Erdboden. Bei diesen geringen Wolkenhöhen liegt  $y$  nun fast konstant bei 1.

Wegen der vereinfachten Annahme über den vertikalen Temperaturgradienten ist der erste Ansatz nicht geeignet, um die langwellige Gegenstrahlung mit ausreichender Genauigkeit zu berechnen, wenngleich die terrestrische Strahlungsflussdichte für geringe Bedeckungsgrade und tiefe Wolken aus Bodentemperatur, Bedeckungsgrad und Wolkenhöhe ableitbar ist. Es soll im weiteren eine Parametrisierung gerechnet werden, die auf die Abhängigkeit von der Wolkenhöhe (und damit vom Temperaturprofil) verzichtet, den Zusammenhang der Gegenstrahlung mit dem Bedeckungsgrad präziser beschreibt und die Taupunktdifferenz als Eingangsparameter benutzt.

## 3.2 Parametrisierung nach Josey et al. (2003)

### 3.2.1 Theoretische Grundlagen

Die Parametrisierung nach Josey et al. (2003) berechnet die abwärts gerichtete langwellige Strahlungsflussdichte auf Grundlage einer effektiven Schwarzkörpertemperatur  $T_{\text{Eff}}$ :

$$F_{\text{terr.}}^{\downarrow} = (1 - \alpha_L) * \sigma * T_{\text{Eff}}^4 \quad (3.8)$$

Hierbei wird  $\alpha_L$  sehr klein gewählt ( $\alpha_L = 0,045$ ), um auszudrücken, dass die langwellige Strahlung annähernd einer Schwarzkörperstrahlung entspricht. Die effektive Schwarzkörpertemperatur kann als Summe der am Boden gemessenen Lufttemperatur  $T_a$  und eines Korrekturterms  $\Delta T_a$  berechnet werden.

$$F_{\text{terr.}}^{\downarrow} = (1 - \alpha_L) * \sigma * (T_a + \Delta T_a)^4 \quad (3.9)$$

$\Delta T_a$  soll die Einflüsse von Bedeckungsgrad  $C$ , Taupunktdifferenz  $D$  und weiteren Variablen  $x$  berücksichtigen. Josey geht von einem additiven Zusammenhang dreier voneinander unabhängiger Funktionen ( $f$ ,  $g$  und  $h$ ) dieser Größen aus:

$$\Delta T_a = f(C) + g(D) + h(x) \quad (3.10)$$

Für die Abhängigkeit vom Bedeckungsgrad  $C$  wird eine Potenzreihe zweiten Grades in  $C$  (mit Konstanten  $a$ ,  $b$  und  $c$ ) angenommen:

$$\Delta T_a = aC^2 + bC + c \quad (3.11)$$

Die Koeffizienten  $a$ ,  $b$ , und  $c$  haben folgende Zahlenwerte:

a	10,77
b	2,34
c	-18,44

**Tabelle 3.3:** Koeffizienten in der Parametrisierung nach Josey et al. (2003) (Alle Werte in der Einheit Kelvin)

Der zweite Term auf der rechten Seite von 3.10 wird als lineare Funktion von der Taupunktsdifferenz  $D$  formuliert:

$$g(D) = 0,84(D + 4,01) \quad (3.12)$$

Aus 3.11 und 3.12 ergibt sich für die langwellige Gegenstrahlung in Abhängigkeit von Bedeckungsgrad und Taupunktsdifferenz:

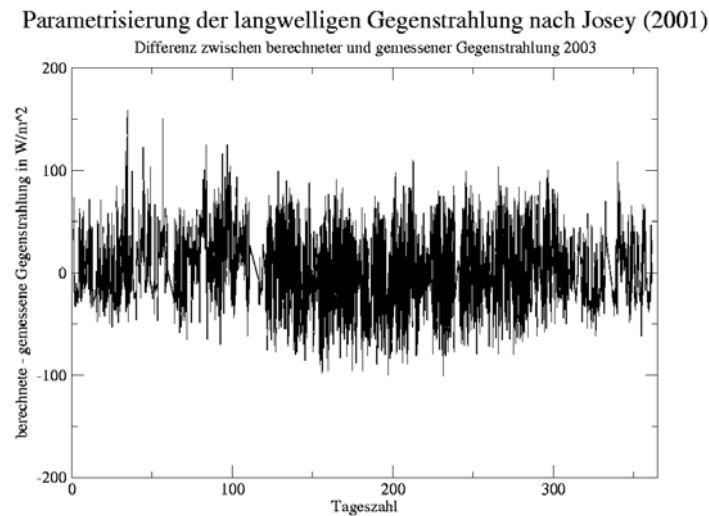
$$F_{\text{terr.}}^{\downarrow} = (1 - \alpha_L) * \sigma * (T_a + aC^2 + bC + c + 0,84(D + 4,01))^4 \quad (3.13)$$

Der Einfluss der in 3.10 als  $x$  bezeichneten weiteren Größen (hierzu gehören z.B. die Bedeckungsgrade in verschiedenen Niveaus) wird im folgenden vernachlässigt, sodass Gleichung 3.13 zunächst zum Ausgangspunkt für die Parametrisierung der langwelligen Strahlungsflussdichte aus dem Halbraum wird. In einem weiteren Abschnitt soll eine nähere Untersuchung der an dieser Stelle vernachlässigten Zusammenhänge erfolgen.

### 3.2.2 Ergebnisse

Die Berechnungen für Kiel wurden ebenfalls auf Grundlage der meteorologischen Daten (hier: Lufttemperatur- und Feuchtemessungen) des Jahres 2003 vorgenommen. Wie bei der Parametrisierung der langwelligen Gegenstrahlung, die von der Wolkenbasistemperatur Gebrauch macht, wurde auch hier für den Bedeckungsgrad die zeitliche Wolkenbedeckung im Zenit über dem Ceilometer verwendet.





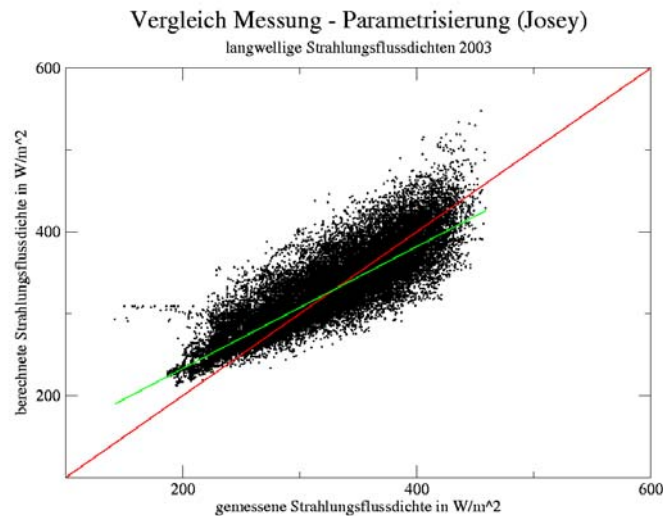
**Abbildung 3.6:** Differenz zwischen berechneter (nach Josey et al. (2003)) und gemessener langwelliger Gegenstrahlung 2003

Die Differenz aus berechneter und gemessener langwelliger Gegenstrahlung in Abbildung 3.6 weist keinen ausgeprägten Jahresgang auf und überschreitet den Betrag von  $100 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  nur in wenigen Fällen. Die mittlere Abweichung über das ganze Jahr beträgt  $0,407 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ , also heben sich positive und negative Abweichungen fast weg. Die Standardabweichung liegt bei  $26,4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ .

Streudiagramm 3.7 zeigt die Abweichungen zwischen Messung und Parametrisierung deutlicher. Um Aussagen darüber treffen zu können, ob die Genauigkeit des Algorithmus von der Bewölkung abhängt, wurden die Berechnungen für Fälle mit Bedeckungsgrad 1, 0 und von 1 und 0 verschiedenen Werten gesondert durchgeführt. Die Ergebnisse sind als Streudiagramme in den Graphiken 3.8, 3.9 und 3.10 wiedergegeben.

Aus diesen Streudiagrammen sind quantitative Aussagen über die Genauigkeit der Parametrisierung in Abhängigkeit vom Bedeckungsgrad nur schwer ableitbar. Tabelle 3.4 soll die Korrelation zwischen gemessener und parametrisierter langwelliger Strahlungsflussdichte in den unterschiedlichen Fällen auflisten.

Die Korrelation ist um so höher, je niedriger der Bedeckungsgrad ist. Bei Bedeckungsgraden unter 5 Achtern verbleibt der Korrelationswert etwa bei 0,86. Ab einer Bewölkung von 6 Achtern nimmt die Korrelation allerdings deutlich ab, wobei ein Minimum bei 7 Achtern zu beobachten ist. Damit liegt die Schlussfolgerung nahe, dass die entscheidende Fehlerquelle im Bedeckungsgrad zu suchen ist. Es reicht offensichtlich nicht aus, nur die zeitliche Wolkenbedeckung unmittelbar über dem Ceilometer zu erfassen. Um zu klären, ob die Korrelation das geeignete Maß für die Qualität des Algorithmus ist, und um zu demonstrieren, wie stark der Fehler durch die Vernachlässigung von Wolkenhöhe und -gattung ist, soll die Berechnung noch einmal ausschließlich am Fallbeispiel des 6. und 7.



**Abbildung 3.7:** Streudiagramm: gemessene und berechnete (nach Josey et al. (2003)) langwellige Gegenstrahlung 2003

Februar 2003 wiederholt werden:

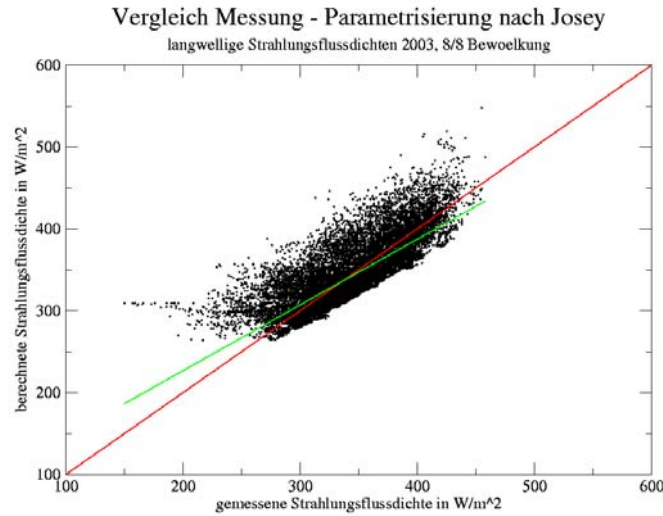
In der ersten Tageshälfte des 6.2.2003 liegt die parametrisierte Gegenstrahlung weniger als  $50 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  über den Messwerten. Gemäß den Wetterbeobachtungen in Tabelle 3.2 kann diesem Zeitraum eine durchbrochene Stratocumulus-Bewölkung zugeordnet werden.

Bis in die Morgenstunden des Folgetages schließt sich eine Phase an, in der die Parametrisierung die gemessene Strahlungsflussdichte um bis zu  $100 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  überschreitet. Während dieser Zeit war eine Bewölkung anzutreffen, welche sich zunächst fast ganz auflockerte, sich dann allerdings unter Absinken der Wolkenbasis zum Morgen wieder verdichtete.

Am 7.2.2003 wird die langwellige Strahlungsflussdichte durch die Parametrisierung nach Josey sogar unterschätzt. Dies geht einher mit dem Auftreten von tiefer stratiformer Bewölkung. Weil Gleichung 3.13 ohne Rücksicht auf die Wolkenhöhe den Bedeckungsgrad als Eingangsgröße zugrunde legt, kann bei gleichem Bedeckungsgrad die Gegenstrahlung einer tieferen Wolkenschicht wegen ihrer (aufgrund möglicherweise vorkommender Inversionen) höheren Temperatur als zu niedrig berechnet werden. Hier liegt die im dritten Term auf der rechten Seite von Gleichung 3.10 beschriebene Unsicherheit der Parametrisierung.

### 3.3 Entwicklung einer modifizierten Parametrisierungsformel: Berücksichtigung der Wolkenhöhe

In diesem Abschnitt soll eine modifizierte Formel zur Parametrisierung der langwelligen Gegenstrahlung entwickelt werden. Sie soll das Konzept von Josey aufgreifen, also die



**Abbildung 3.8:** Streudiagramm: gemessene und (nach Josey et al. (2003)) berechnete langwellige Gegenstrahlung 2003, bedeckter Himmel

Abhängigkeit der Strahlungsflussdichte von Temperatur, Taupunktdifferenz und Bedeckungsgrad beibehalten. Zusätzlich soll aufgrund der Beobachtungen in Graphik 3.11 der Einfluss der Wolkenhöhe zum Ausdruck gebracht werden.

### 3.3.1 Separationsansatz

Josey separiert in Gleichung 3.10 die Abhängigkeit der langwelligen Strahlungsflussdichte von Bedeckungsgrad, Taupunktdifferenz und Wolkenhöhe durch eine Linearkombination von Funktionen, welche von diesen Variablen abhängen. Anstelle der von Josey nicht weiter spezifizierten Variable  $x$  soll die Funktion  $h$  nun direkt und ausschließlich von der Wolkenhöhe  $z$  abhängen.

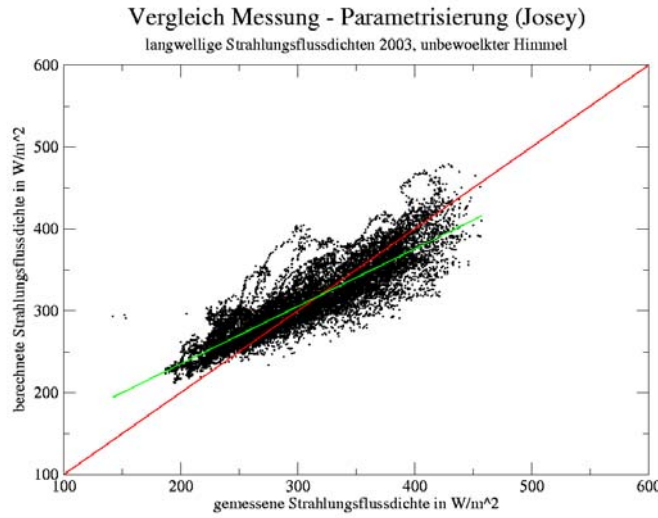
$$\Delta T_a = f(C) + g(D) + h(z) \quad (3.14)$$

In diesem Sinne soll die bisher vernachlässigte Funktion  $h(z)$  in einer Modifikation additiv zu den bisher im Korrekturterm  $\Delta T_a$  zusammengefassten Größen hinzugezählt werden.

Entsprechend Gleichung 3.15 soll der Term  $h(z)$ , welcher die Dimension einer Temperatur hat, linear in  $z$  sein:

$$h(z) = \Gamma_h * z + T_h \quad (3.15)$$

Ersichtlicherweise hat  $\Gamma_h$  die physikalische Bedeutung des vertikalen Temperaturgradienten. Weil die Ergebnisse aus dem Beginn dieses Kapitels gezeigt haben, dass ein tro-



**Abbildung 3.9:** Streudiagramm: gemessene und (nach Josey et al. (2003)) berechnete langwellige Gegenstrahlung 2003, unbewölkter Himmel

ckenadiabatischer Temperaturgradient  $\Gamma_d = 1 \frac{\text{K}}{100\text{m}}$  unterhalb der Wolkenbasis nicht immer vorliegt, sollen für Gleichung 3.15 die Koeffizienten durch Regression ermittelt werden. Hierzu seien folgende Hilfsgrößen definiert:

Sei  $T_J$  die Summe aus  $T_a$  und  $\Delta T_a$ . Dann schreibt sich Gleichung 3.13:

$$F_{\text{terr.}}^{\downarrow} = (1 - \alpha_L) * \sigma * T_J^4 \quad (3.16)$$

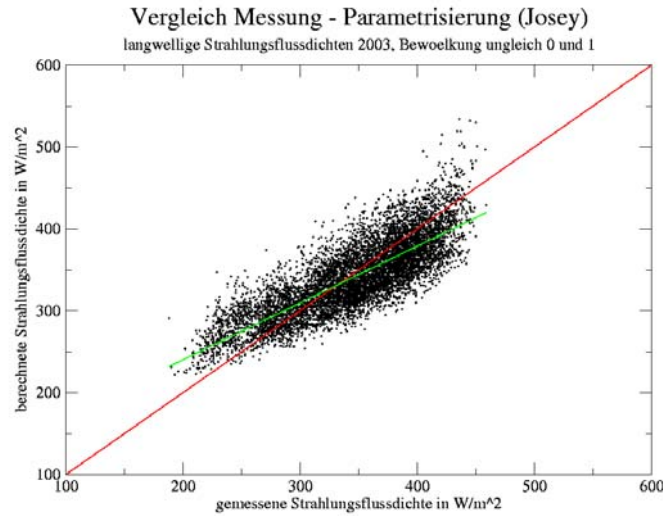
Der Fehlbetrag zwischen den nach Josey berechneten und den gemessenen Strahlungsflussdichten, welche mit  $F_m^{\downarrow}$  bezeichnet werden sollen, soll durch den Korrekturterm  $h(z)$  (additiv zu  $T_J$ ) ausgeglichen werden. Auf diese Weise soll auf der Grundlage der vorhandenen Messwerte für  $F_m^{\downarrow}$  aus dem Jahr 2003 die Koeffizientenanpassung für  $\Gamma_h$  und  $T_h$  vorgenommen werden:

$$F_m^{\downarrow} = (1 - \alpha_L) * \sigma * (T_J + h(z))^4 \quad (3.17)$$

Auflösen nach  $h(z)$  ergibt:

$$h(z) = \sqrt[4]{\frac{F_m^{\downarrow}}{(1 - \alpha_L) * \sigma}} - T_J \quad (3.18)$$

Die Informationen über  $z$  stammen aus den über 8 Minuten gemittelten Wolkenhöhen, die zeitgleich mit den Messwerten für  $F_m^{\downarrow}$  vorliegen. In Diagramm 3.12 wurde die Temperaturgröße  $h$  in Abhängigkeit von der Wolkenhöhe aufgetragen. Eine lineare Regression führt auf die in Gleichung 3.15 noch unbekannten Koeffizienten.



**Abbildung 3.10:** Streudiagramm: gemessene und (nach Josey et al. (2003)) berechnete langwellige Gegenstrahlung 2003, Bewölkung von 0 und 1 verschieden

Die Regressionsgerade genügt der Gleichung

$$h(z) = -0,38 * z + 1,18 \quad (3.19)$$

Damit ergibt sich für  $\Gamma_h$  der betragsmäßig niedrige Wert von  $0,38 \frac{K}{km}$ , was eine noch weit geringere vertikale Temperaturabnahme ist, als es bei einem feuchtadiabatischen Temperaturgradienten der Fall wäre ( $\Gamma_f = -6,5 \frac{K}{km}$ ). Eine Fehlerursache ist dadurch gegeben, dass fehlende Bewölkung durch einen Ersatzwert der Wolkenhöhe von 8 km ausgedrückt wird. Dadurch ergibt sich bei synoptisch völlig unterschiedlichen Situationen, welche unterschiedlich große Wolkenlücken über dem Ceilometer und unterschiedliche vertikale Temperaturgradienten aufweisen (aber den Wert 8 km für  $z$  gemeinsam haben), eine große Bandbreite von möglichen Werten für  $h(z)$ . Das gewonnene  $\Gamma_h$  soll im weiteren als statistisches Standardprofil eingesetzt werden. Der Wert 1,18 K für  $T_h$  kann einfach als Konstante in die neue Parametrisierungsformel übernommen werden.

Insgesamt ergibt sich die Formel zur Parametrisierung der langwelligen Gegenstrahlung in Abhängigkeit von der Wolkenhöhe nach Gleichung 3.20:

$$F_{terr.}^{\downarrow} = (1 - \alpha_L) * \sigma * (T_a + aC^2 + bC + c + 0,84(D + 4,01) + \Gamma_h * z + T_h)^4 \quad (3.20)$$

In Abbildung 3.13 sind die Ergebnisse der modifizierten Josey-Parametrisierung über das ganze Jahr 2003 dargestellt.

Ebenso wie im Abschnitt, der sich mit Joseys Parametrisierung befasste, soll auch hier eine getrennte Betrachtung der Fälle stattfinden, in denen der Bedeckungsgrad gleich 1,

Bewölkung C	Korrelation
0/8	0,891
1/8	0,868
2/8	0,862
3/8	0,861
4/8	0,859
5/8	0,855
6/8	0,808
7/8	0,748
8/8	0,787
alle Fälle	0,858

**Tabelle 3.4:** Korrelation zwischen gemessener und parametrisierter langwelliger Strahlungsflussdichte

0 oder von diesen Werten verschieden war. Die Ergebnisse sind in den Streudiagrammen 3.14, 3.15 und 3.16 dargestellt.

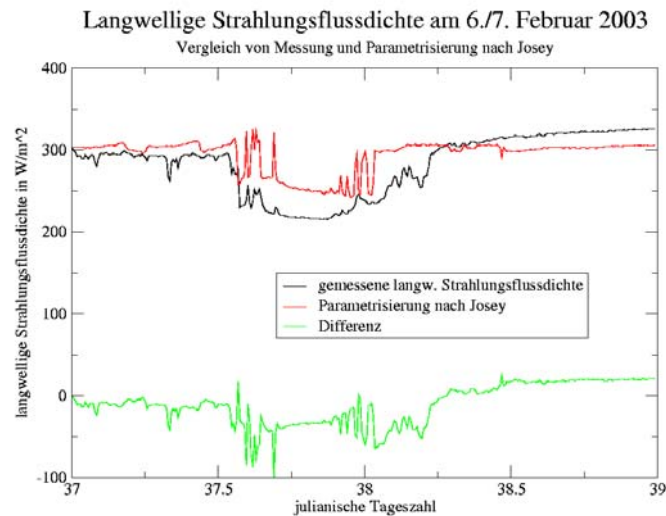
Die Korrelationen zwischen gemessener und parametrisierter terrestrischer Strahlungsflussdichte gehen aus Tabelle 3.5 hervor:

Bewölkung C	Korrelation
0/8	0,891
1/8	0,865
2/8	0,859
3/8	0,859
4/8	0,856
5/8	0,855
6/8	0,810
7/8	0,759
8/8	0,801
alle Fälle	0,864

**Tabelle 3.5:** Korrelation zwischen gemessener und parametrisierter langwelliger Strahlungsflussdichte

Damit ist speziell bei hohen Bedeckungsgraden eine leichte Verbesserung gegenüber der Original-Parametrisierung nach Josey eingetreten. Der Verlauf der terrestrischen Strahlungsflussdichte bei bekannter Bewölkung soll auch in diesem Abschnitt (in Graphik 3.17) noch einmal am Fallbeispiel des 6./7. Februar 2003 dargestellt werden:

Es fällt schwer, einen Unterschied im Verlauf der Differenzkurven in den Graphiken 3.11 und 3.17 zu erkennen, weil die Resultate offenbar sehr ähnlich sind. Um eine klarere Aussage darüber treffen zu können, ob die modifizierte Parametrisierung in Abhängigkeit von der Wolkengattung bessere Ergebnisse erzeugt, sollen in Abbildung 3.18 die beiden jeweils grünen Kurven aus diesen beiden Abbildungen übereinander gelegt werden.

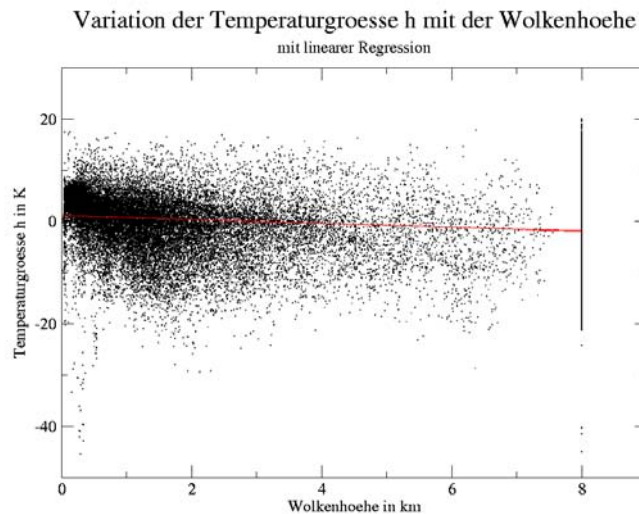


**Abbildung 3.11:** Verlauf von gemessener und parametrisierter langwelliger Gegenstrahlung am 6./7. Februar 2003

Die schwarze Kurve in Abbildung 3.18 liegt in der ersten Tageshälfte näher am Ordinatenwert 0 als die rote Kurve (um weniger als  $5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ ). Dies weist auf eine stärkere Unterschätzung der Gegenstrahlung von Stratocumuluswolken durch die veränderte Parametrisierung hin. Allerdings kehrt sich dieses Verhältnis ab den Nachmittagsstunden um: Bis zum Ende des untersuchten Zeitraumes ist der Fehler der berechneten terrestrischen Strahlung im Falle der in dieser Arbeit modifizierten Parametrisierung stets geringer als im Falle der ursprünglichen Josey-Parametrisierung. Der Unterschied zwischen beiden Kurven beträgt bis zu  $5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ . Sowohl bei aufgelockerter Bewölkung ab dem Nachmittag des 6. Februars als auch bei der fast aufliegenden Wolkensschicht am 7. Februar lassen sich damit etwas genauere Ergebnisse gewinnen.

### 3.4 Fazit

Die Befunde aus dem ersten Abschnitt dieses Kapitels zeigen auf, dass die alleinige Kenntnis von Bedeckungsgrad und Wolkenhöhe nicht ausreicht, um von der Bodentemperatur auf die Wolkenbasistemperatur und die ihr (nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz) zugeordnete terrestrische Strahlungsflussdichte zu schließen. Die Berechnungen nach Gleichung 3.3 vernachlässigen jeglichen Einfluss der Luftschichtung. Entsprechend ergibt sich für das Jahr 2003 speziell bei hohem Bedeckungsgrad eine unbefriedigende Übereinstimmung zwischen berechneter und gemessener Strahlungsflussdichte, die durch eine Korrelation von 0,632 (alle Bedeckungsgrade) ausgedrückt werden kann. Die Parametrisierung nach Josey et al. (2003) schließt die Abhängigkeit der Gegen-

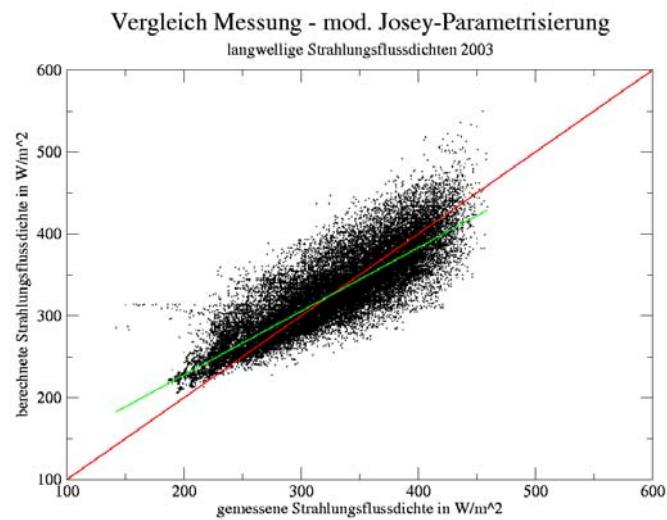


**Abbildung 3.12:** Variation des Korrekturterms  $h$  mit der Wolkenhöhe

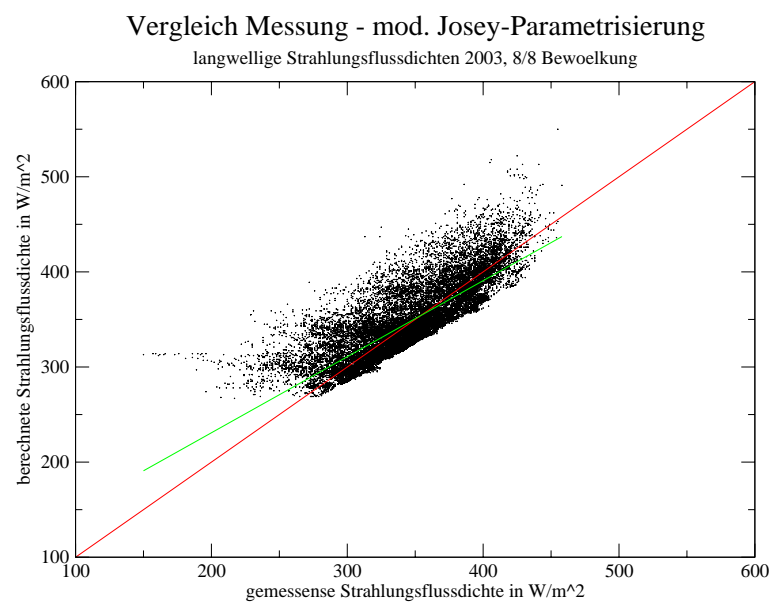
strahlung von der bodennahen Taupunktdifferenz ein und stellt durch Reihenentwicklung einen präziseren funktionalen Zusammenhang der Gegenstrahlung mit dem Bedeckungsgrad auf. Die berechnete terrestrische Strahlungsflussdichte folgt der gemessenen mit einer Abweichung, welche auf den bisher vernachlässigten Einfluss der Wolkenhöhe zurückzuführen ist.

Um diesen Fehler zu vermindern, wurde eine Modifikation entwickelt, die eine lineare Abhängigkeit der Wolkenbasistemperatur von der Wolkenhöhe postuliert. Auf der Grundlage der Wolkendaten und der sonstigen meteorologischen Messdaten des Jahres 2003 wurde eine Anpassung der beiden Koeffizienten im Korrekturterm durchgeführt und damit ein allgemeines Vertikalprofil der Temperatur angenommen. Mittels der durch Regression gewonnenen Koeffizienten wurde die terrestrische Strahlungsflussdichte nochmals für das Jahr 2003 berechnet. In der Tat konnte bei größeren Bedeckungsgraden (speziell bei Bedeckungsgrad 1) die Korrelation von gemessener und parametrisierter Gegenstrahlung verbessert werden und die Differenz beider Größen in einem Fallbeispiel um einige  $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  leicht vermindert werden. Wegen der großen Streuung der Werte in Diagramm 3.12 und der damit ungenauen Regression bleibt ein Fehlbetrag erhalten. Eine andere Optimierungsmöglichkeit der Josey-Parametrisierung wäre es, den Term  $h$  unabhängig von der Wolkenhöhe  $z$  an die Messdaten anzupassen. Weitere Eingangsparameter wie beispielsweise die Luftschichtung unterhalb der Wolkenbasis können nicht zur Präzisierung der Formel herangezogen werden, weil es an Messungen mangelt.

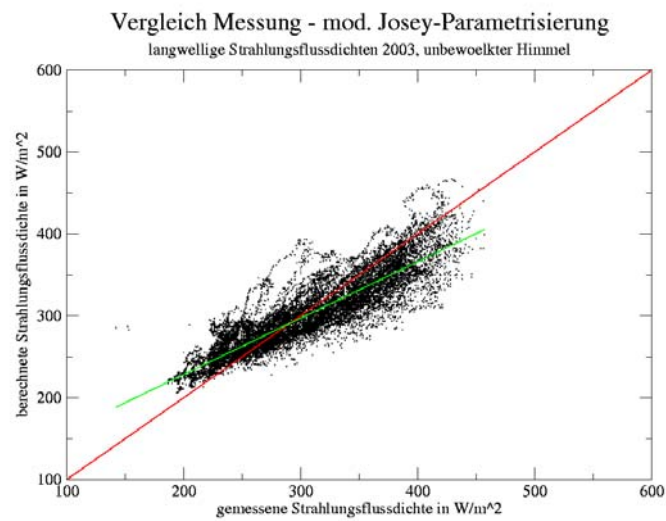




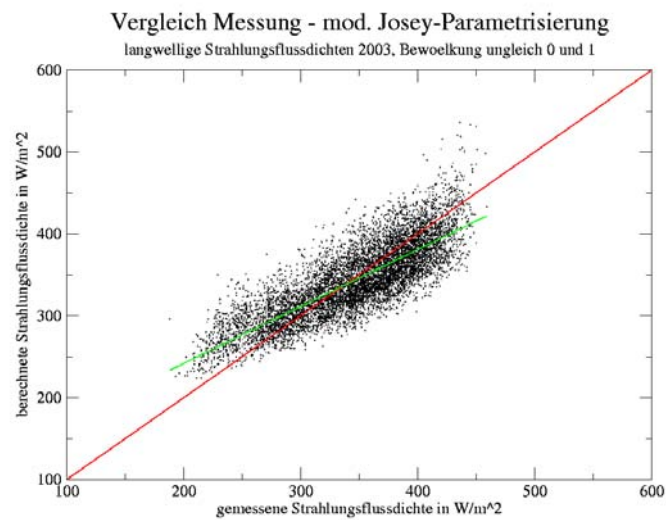
**Abbildung 3.13:** Streudiagramm: gemessene und berechnete (neue Parametrisierung) langwellige Gegenstrahlung 2003



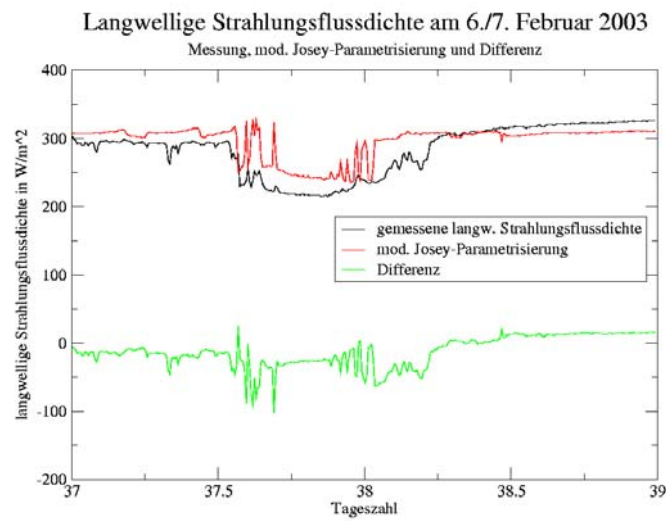
**Abbildung 3.14:** Streudiagramm: gemessene und berechnete (neue Parametrisierung) langwellige Gegenstrahlung 2003



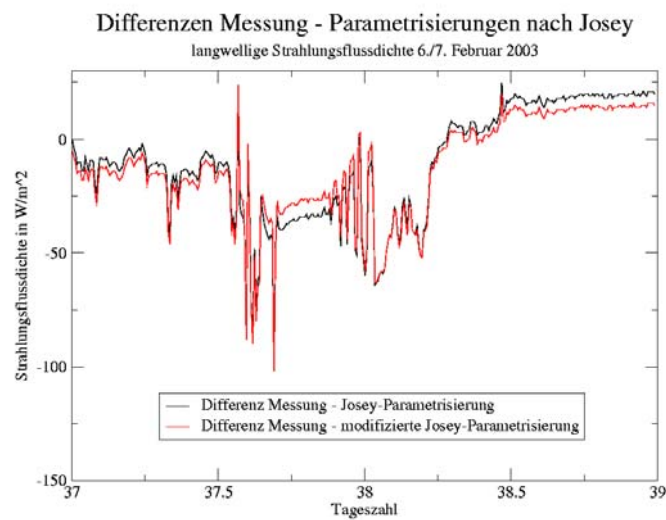
**Abbildung 3.15:** Streudiagramm: gemessene und berechnete (neue Parametrisierung) langwellige Gegenstrahlung 2003



**Abbildung 3.16:** Streudiagramm: gemessene und berechnete (neue Parametrisierung) langwellige Gegenstrahlung 2003



**Abbildung 3.17:** Verlauf von gemessener und parametrisierter Gegenstrahlung am 6./7. Februar 2003



**Abbildung 3.18:** Differenzen zwischen Messung und Parametrisierung der Gegenstrahlung am 6./7. Februar 2003



## Kapitel 4

# Parametrisierung der kurzwelligen Einstrahlung

In diesem Kapitel wird auf der Grundlage der vorliegenden meteorologischen Messdaten und mit Hilfe von Wolkenkamerabildern die kurzwellige Strahlungsflussdichte parametrisiert. Die Berechnungen werden anhand von sechs Parametrisierungsalgorithmen vorgenommen, die jeweils auf drei Beispieltage im Jahr 2006 angewendet werden. Es soll geklärt werden, wie sich die Solarstrahlung an Tagen mit inhomogener Schauerbewölkung, sommerlicher Cumulusbewölkung sowie homogener Stratocumulusbewölkung errechnen lässt.

### 4.1 Grundlagen

Die am Erdboden auftreffende solare Strahlungsflussdichte  $F_{\text{solar}}^{\downarrow}$  ist als meteorologische Größe von sehr vielen Parametern abhängig:

- Die Solarkonstante  $S_0$ . Ihr Zahlenwert beträgt nach neuesten Angaben  $1362 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ . Über den Parametrisierungszeitraum (Jahr 2006) kann dieser Wert als konstant angesehen werden. Viel größere Fluktuationen werden verursacht durch:
- Sonnenzenitwinkel  $\theta$ . Dieser berechnet sich aus dem julianischen Tag  $T$  und der Uhrzeit sowie der geographischen Länge  $\lambda$  und Breite  $\phi$  des Standortes. Hinzu kommt eine Korrektur aufgrund der Bewegung von Sonne und Erde um den gemeinsamen Schwerpunkt.

Der Sonnenzenitwinkel ist definitionsgemäß gleich Null, wenn die Sonne genau im Zenit steht. In seine Berechnung gehen die geographische Breite  $\phi$ , die Deklination  $\delta$  und der Stundenwinkel  $h$  ein:

$$\cos \theta = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos h \quad (4.1)$$

Für die Deklination  $\delta$  und die weiteren Größen werden Formeln aus der Arbeit von Kalisch (2005) verwendet, die aus WMO - No.8 (1996) stammen. Gemäß Gleichung

4.2 wird für  $\delta$  von einer Hilfsgröße  $x$  Gebrauch gemacht.

$$\delta = \arcsin(0,397748 \sin(x - 77,51^\circ + 1,92^\circ \sin x)) \quad (4.2)$$

Dabei gilt für  $x$ :

$$x = 0,9856^\circ T - 2,72^\circ \quad (4.3)$$

Der Stundenwinkel lässt sich aus der wahren Ortszeit nach Gleichung 4.4 berechnen:

$$h = \frac{2\pi(\text{WOZ} - 12 \cdot 3600\text{s})}{86400\text{s}} \quad (4.4)$$

Die wahre Ortszeit WOZ ist eine Zeitgröße, die sich in eine mittlere Ortszeit MOZ und den sich im Jahresverlauf unregelmäßig ändernden Term der Zeitgleichung Z zerlegen lässt.

$$\text{WOZ} = \text{MOZ} + Z \quad (4.5)$$

Die mittlere Ortszeit ist von der geographischen Länge  $\lambda$  abhängig:

$$\text{MOZ} = \text{UTC} + \lambda * 4 * 60\text{s} \quad (4.6)$$

Hierbei ist UTC die Greenwich-Zeit. Die Zeitgleichung Z ist über die Größe  $x$  vom julianischen Tag T abhängig:

$$Z = (-7,66 \sin x - 9,87 \sin(2x + 24,99^\circ + 3,83^\circ \sin x)) * 60\text{s} \quad (4.7)$$

Wie in der Arbeit von Kalisch (2005) soll auch hier eine Auflösung für Z von einem Tag ausreichen.

- Bewölkungsgrad C. Wolken können in Abhängigkeit von ihren optischen Eigenschaften und dem Einstrahlungswinkel die solare Strahlung durch Streuung schwächen oder in Einzelfällen auch die Globalstrahlung über den bei wolkenfreiem Himmel zu erwartenden Wert erhöhen (Broken-Cloud-Effekt, vgl. Heise (2004)).
- Partialdruck des Wasserdampfes in der Atmosphäre  $p_w$ . Luftfeuchtigkeit kann auch bei wolkenfreiem Himmel eine nicht zu vernachlässigende Absorption im solaren Infrarot hervorrufen, die besonders beim Zillman-Algorithmus berücksichtigt wird.

Folgende Algorithmen wurden zur Parametrisierung der solaren Einstrahlung herangezogen:

basierend auf Wolkenkategorien

- Lumb (1964)
- Lind et al. (1984)

- nichtlineare Parametrisierung nach Dobson und Smith (1988) (Bedeckungsgrad erforderlich)

basierend nur auf Bedeckungsgrad

- Zillman (1972), modifizierte Berechnung nach Kalisch (2006)
- lineare Parametrisierung nach Dobson und Smith (1988)

Mit den vorgestellten Algorithmen wurde die solare Strahlungsflussdichte an drei Beispieltagen des Jahres 2006 berechnet und mit der auf dem Dach des Westgebäudes (IFM-Geomar) gemessenen Strahlungsflussdichte verglichen.

## 4.2 Die verwendeten Algorithmen

### 4.2.1 Lumb (1964)

Im Algorithmus nach Lumb hängt die solare Strahlungsflussdichte  $F_{\text{sol}}^{\downarrow}$  in nichtlinearer Weise vom Cosinus des Sonnenzenitwinkels ab:

$$F_{\text{sol}}^{\downarrow} = A(i) \cos \theta + B(i) \cos^2 \theta \quad (4.8)$$

Die Koeffizienten  $A(i)$  und  $B(i)$  sind jeweils von der Wolkenkategorie  $i$  abhängig. Die Parametrisierung nach Lumb benutzt insgesamt 9 verschiedene Kategorien.

Kategorie $i$	vorherrschende Wolken	$A(i)$	$B(i)$
1	Bewölkung $\leq 2/8$	0,61	0,20
2	tiefe Wolken, Bedeckung $< 6/8$	0,38	0,34
3	viele cirrusartige Wolken	0,32	0,43
4	dünne Schichten mittelhoher Wolken	0,24	0,45
5	Himmel mit Cirrostratus bedeckt	0,19	0,43
6	tiefe Wolken, Bedeckung $\geq 6/8$	0,17	0,30
7	dicke Schichten mittelhoher Wolken	0,16	0,13
8	tiefe Wolken, Nieselregen	0,08	0,11
9	tiefe Wolken, Regen (keine Schauer)	0,03	0,14

**Tabelle 4.1:** Koeffizienten in Gleichung 4.8 nach Lumb (1964)

### 4.2.2 Lind et al. (1984)

Lind et al. (1984) greift in seiner Parametrisierung den Ansatz nach Lumb (Gleichung 4.8) auf und geht von derselben Bestimmungsgleichung für die solare Strahlungsflussdichte aus. Es kommt zur gleichen Einteilung der Bewölkung in die einzelnen Kategorien. Der Unterschied zu Lumb besteht darin, dass jeweils andere Koeffizientenpaare verwendet werden.

Kategorie i	A(i)	B(i)
1	0,480	0,359
2	0,383	0,443
3	0,363	0,420
4	0,308	0,453
5	0,250	0,366
6	0,181	0,321
7	0,221	0,256
8	0,124	0,206
9	0,076	0,186

**Tabelle 4.2:** Koeffizienten in Gleichung 4.8 nach Lind et al. (1984)

#### 4.2.3 Lineare Parametrisierung nach Dobson und Smith (1988)

Die Berechnung der solaren Strahlungsflussdichte nach Dobson und Smith (1988) erfolgt ebenfalls nach Gleichung 4.8. Allerdings hängen die Koeffizienten A und B nicht von der Wolkenkategorie i, sondern vom Bedeckungsgrad C in Achtel ab. So kommen wieder 9 Einzelfälle zustande.

C(in Achtel)	A(C)	B(C)
0	0,400	0,386
1	0,517	0,317
2	0,474	0,381
3	0,421	0,413
4	0,380	0,468
5	0,350	0,457
6	0,304	0,438
7	0,230	0,384
8	0,106	0,285

**Tabelle 4.3:** Koeffizienten in Gleichung 4.8 nach Dobson und Smith (1988)

#### 4.2.4 Nichtlineare Parametrisierung nach Dobson und Smith (1988)

Dieser Algorithmus bestimmt zunächst den Transmissionsfaktor T der bewölkten Atmosphäre:

$$T = F \exp(-D_0/s) C [\exp(-D_i/s) + E_i] + (1 - C) \quad (4.9)$$

- F ist der Bruchteil der Solarstrahlung bei unbewölktem Himmel, der nicht durch atmosphärische Gase absorbiert wird.
- $D_0$  ist die optische Dicke der unbewölkten Atmosphäre für direkte Solarstrahlung.
- i bezieht sich auf die Wolkenkategorie (es werden 10 Kategorien gebildet).



- $D_i$  ist die von der Wolkenkategorie abhängige optische Dicke (für direkte Solarstrahlung).
- $s$  ist der Sinus des Sonnenzenitwinkels.
- $E_i$  ist der Transmissionsfaktor der jeweiligen Wolkenart für diffuse Strahlung.
- $C$  ist der Bedeckungsgrad (hier: zwischen 0 und 1).

Die Koeffizientenpaare  $D_i$  und  $E_i$  werden Tabelle 4.4 entnommen. Die Schlüsselzahlen der Wolkenarten sind in Tabelle B.2 zusammengefasst.

Kategorie i	zugehörige Wolkenarten	$D_i$	$E_i$
1	$C_L1, C_M4, C_H1, 4, 5, 8$	1,50	0,680
2	$C_L2, 9, C_H2, 6, 9$	1,72	0,579
3	$C_L3, C_M5, 8$	1,69	0,520
4	$C_L4, C_H3, 7$	1,80	0,501
5	$C_L5, C_M1, 9$	1,58	0,366
6	$C_L6$ , dichter Nebel	1,56	0,322
7	$C_L7, C_M2$	1,90	0,246
8	$C_L8$	1,49	0,429
9	$C_M3, 6$	1,38	0,539
10	$C_M7$	1,64	0,415

**Tabelle 4.4:** Koeffizienten in Gleichung 4.9 nach Dobson und Smith (1988)

Insgesamt ergibt sich die solare Strahlungsflussdichte  $F_{\text{solar}}^\downarrow$  über den Transmissionsfaktor  $T$  und den Sonnenzenitwinkel  $\theta$  nach Dobson und Smith nach Gleichung 4.10.

$$F_{\text{solar}}^\downarrow = T * S_0 * \cos \theta \quad (4.10)$$

#### 4.2.5 Zillman (1972), Kalisch (2006)

Der Zillman-Algorithmus bestimmt den Transmissionsfaktor  $T_0$  der unbewölkten Atmosphäre in Abhängigkeit vom Wasserdampfdruck  $p_w$ :

$$T_0 = \cos \theta * \frac{1}{(\cos \theta + 2.7) * p_w * 10^{-3} + 1.085 \cos \theta + 0.1} \quad (4.11)$$

$T_0$  ist die Grundlage für die solare Strahlungsflussdichte bei unbewölkter Atmosphäre  $Q_{\text{SW}}$ :

$$Q_{\text{SW}} = S_0 * \cos \theta * T_0 \quad (4.12)$$

mit der Solarkonstanten  $S_0$ . Für bewölkten Himmel kommt ein Transmissionfaktor  $T_W$  hinzu, der nichtlinear vom Bedeckungsgrad  $C$  abhängt:

$$T_W = 1.0 - 0.6 * C^3 \quad (4.13)$$

So ergibt sich die Abhängigkeit von der vorhandenen Bewölkung errechnete solare Strahlungsflussdichte  $F_{\text{sol}}^{\downarrow}$ :

$$F_{\text{sol}}^{\downarrow} = Q_{\text{SW}} * T_{\text{W}} \quad (4.14)$$

Kalisch (2006) modifizierte einzelne Koeffizienten in Gleichung 4.11 und 4.13:

$$T_0 = \cos \theta * \frac{1}{(\cos \theta + 2.55) * p_{\text{W}} * 10^{-3} + 1.12 \cos \theta + 0.1} \quad (4.15)$$

$$T_{\text{W}} = 1.0 - 0.55 * C^3 \quad (4.16)$$

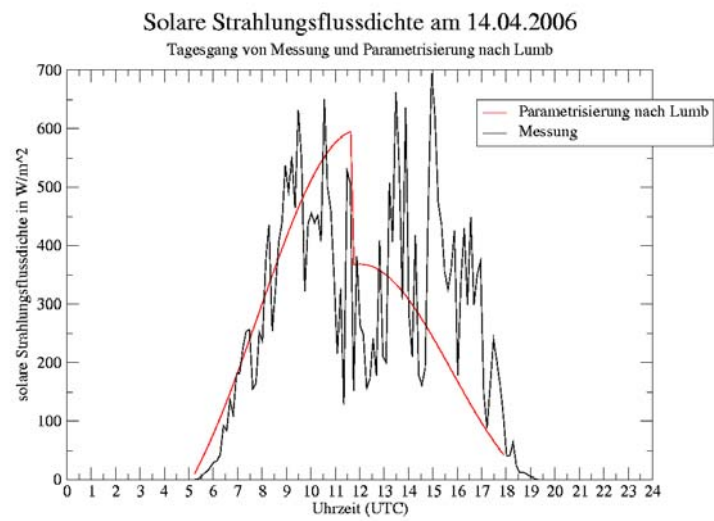
Die Informationen über diese Koeffizienten stammen aus persönlichen Mitteilungen.

### 4.3 14.04.2006: inhomogene Schauerbewölkung

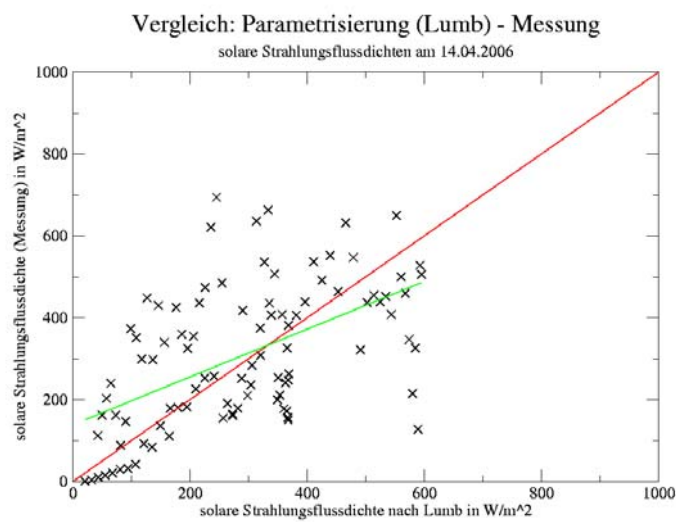
Das Wetter des 14.04.2006 war geprägt durch eine lockere konvektive Bewölkung am Vormittag, deren Bedeckungsgrad bis 13:45 MESZ meist kleiner als 4 Achtel war. Danach verdichteten sich die Wolken auf bis zu 6 bis 7 Achtel, und es regnete zeitweise schauerartig aus der durchbrochenen Bewölkung. In diesem Abschnitt soll untersucht werden, wie die Algorithmen die solare Strahlungsflussdichte bei einer Bewölkung beschreiben, die einerseits durch temporäre Lücken direkte Solarstrahlung transmittiert, andererseits aber auch diffuses Streulicht zum Erdboden gelangen lässt und damit in besonderen Fällen Strahlungserhöhungen gegenüber einem unbewölktem Himmel hervorrufen kann.

#### 4.3.1 Lumb und Lind

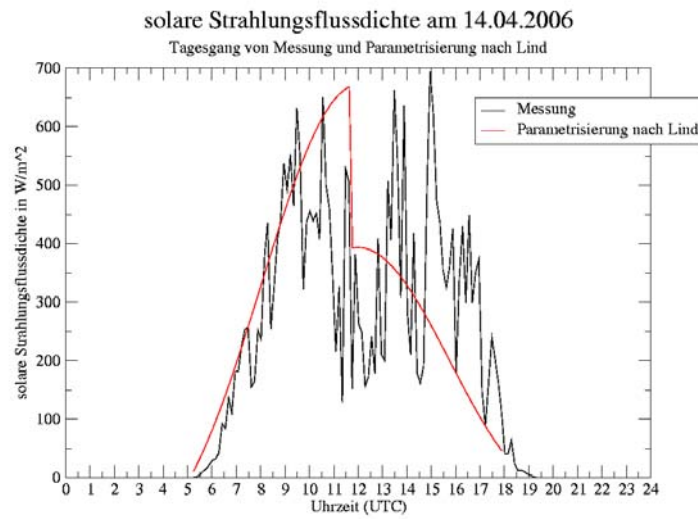
Gemäß der in Tabelle 4.1 genannten Kategorien kommt ab 13:45 MESZ nur noch die Kategorie 6 in Frage. Somit kommt ein unrealistisch sinusförmiger Verlauf der Einstrahlungskurven nach Lumb und Lind zustande. Zwar ist die parametrisierte solare Einstrahlung in beiden Parametrisierungen bis etwa 10 Uhr UTC etwa im Einklang mit den Messwerten (vgl. Abbildungen 4.1 und 4.3), was durch die geringe Bewölkung zu begründen ist. Wegen der Unmöglichkeit, den vorliegenden Bewölkungszustand gemäß der optischen Dicke feiner in Kategorien zu differenzieren, können die Strahlungsmaxima, die am frühen Nachmittag bis zu  $600-700 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  betragen, nicht durch die Parametrisierung wiedergegeben werden. Kategorie 6 beinhaltet sowohl homogene Stratocumulus-Wolken als auch inhomogene Schauerbewölkung, die durch Streulicht kurzzeitige Strahlungserhöhungen hervorrufen kann. Die in den Messwerten durch die inhomogene Bewölkung erzeugten Fluktuationen der solaren Strahlungsflussdichte werden in den Parametrisierungen nach Lumb und Lind durch eine monotone und nur vom Sonnenzenitwinkel abhängige Strahlungsflussdichte dargestellt. Die ungenügenden Ergebnisse spiegeln sich auch in den Streudiagrammen 4.2 und 4.4 wider.



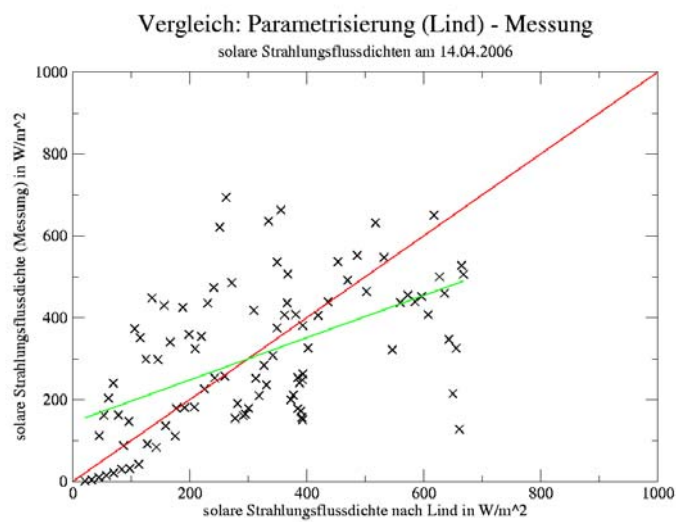
**Abbildung 4.1:** Tagesgang der berechneten (nach Lumb) und gemessenen solaren Strahlungsflussdichte am 14.04.2006



**Abbildung 4.2:** Streudiagramm: Berechnete (nach Lumb) und gemessene solare Strahlungsflussdichte am 14.04.2006



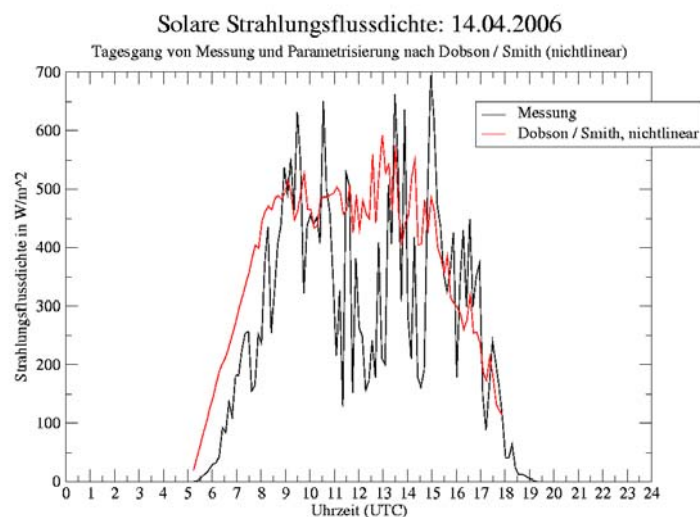
**Abbildung 4.3:** Tagesgang der berechneten (nach Lind) und gemessenen solaren Strahlungsflussdichte am 14.04.2006



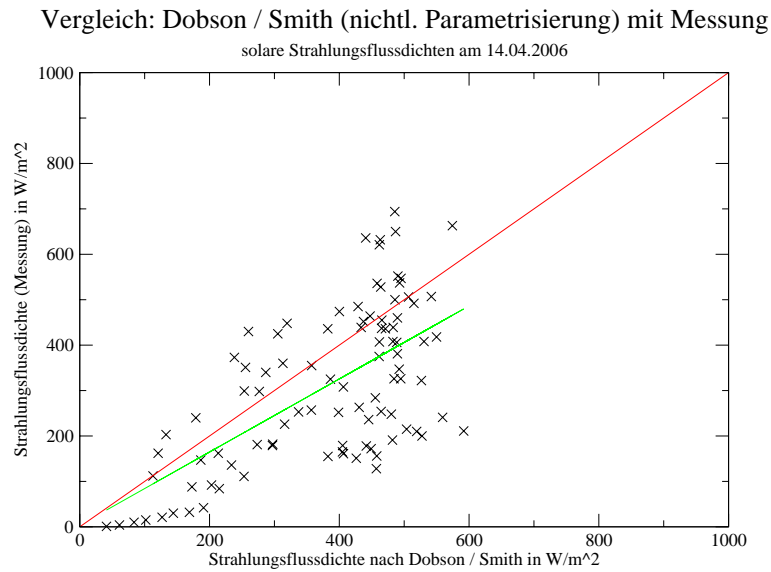
**Abbildung 4.4:** Streudiagramm: Berechnete (nach Lind) und gemessene solare Strahlungsflussdichte am 14.04.2006

### 4.3.2 Dobson / Smith, nichtlineare Parametrisierung

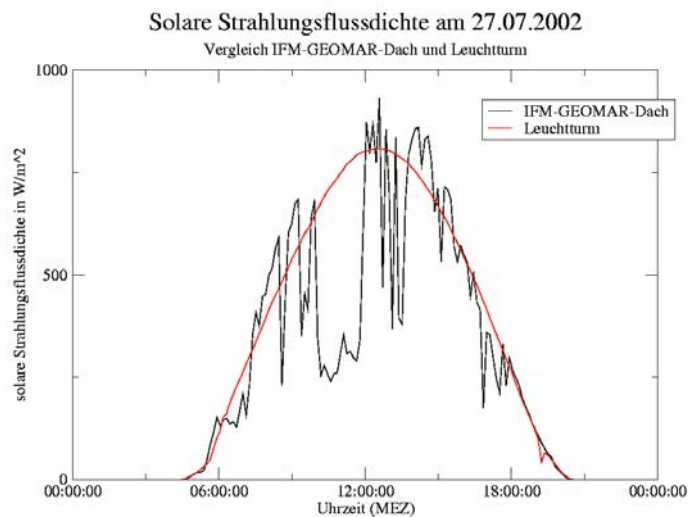
Während des Morgens (bis 9 Uhr UTC, entsprechend 11 Uhr MESZ) wird bei gering bewölktem Himmel (Kategorie 1) die solare Strahlungsflussdichte un ca.  $100 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  überschätzt, wie aus Abbildung 4.5 ersichtlich ist. Bessere Übereinstimmungen ergeben sich erst am Vormittag bei dichten Wolken, die zur Kategorie 8 zu zählen sind. Im Streudiagramm 4.6 ist eine Punkthäufung unterhalb der Identitätsgeraden erkennbar. Nur selten ist die tatsächliche Strahlungsflussdichte größer als die berechnete. Dies ist aber bei Werten um  $400 - 700 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  (gemessen) besonders ausgeprägt. Eine Erklärung ist möglicherweise der durch die Parametrisierung unbefriedigend beschreibbare Broken-Cloud-Effekt, der bei der durchbrochenen Schauerbewölkung (z.B. gegen 9 Uhr UTC) für eine Strahlungserhöhung verantwortlich sein kann. Heise (2004) hat dieses Phänomen im Zusammenhang mit Cumulus-Wolken bei Seewind untersucht. Ein besonders markanter Verlauf der Kurven der solaren Strahlungsflussdichte war am 27. Juli 2002 gegeben. An der Messstation am Kieler Leuchtturm ist bei fehlender Bewölkung diese Kurve fast sinusförmig, während auf dem Dach des IFM-Geomar-Westgebäudes die solare Strahlungsflussdichte gegenüber dem Referenzwert für unbewölkten Himmel zum Teil um über  $150 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  erhöht ist. In Abbildung 4.7 soll dieses Beispiel als Illustration dafür dienen, dass der Broken-Cloud-Effekt bei geeigneter Bewölkung einen keineswegs zu vernachlässigenden Einfluss auf die Strahlungsbilanz ausübt.



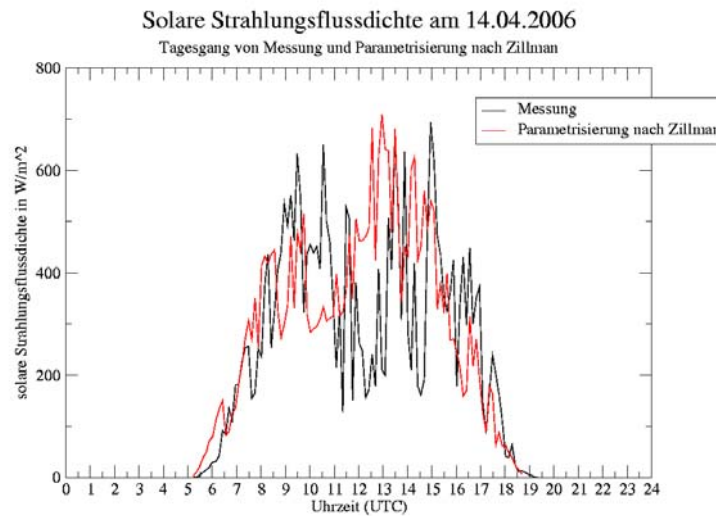
**Abbildung 4.5:** Tagesgang der berechneten (nach Dobson / Smith, nichtlineare Parametrisierung) und gemessenen solaren Strahlungsflussdichte am 14.04.2006



**Abbildung 4.6:** Streudiagramm: Berechnete (nach Dobson / Smith, nichtlineare Parametrisierung) und gemessene solare Strahlungsflussdichte am 14.04.2006



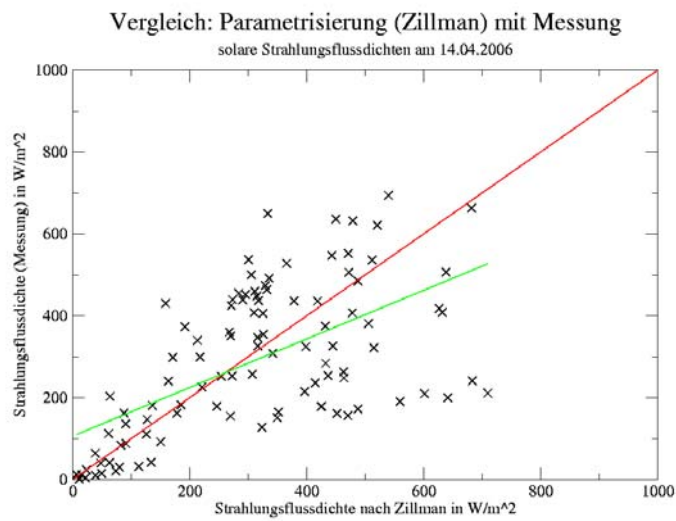
**Abbildung 4.7:** Verlauf der solaren Strahlungsflussdichte (Institut und Leuchtturm) am 27.07.2002. Graphik aus eigenem Datenbestand reproduziert.



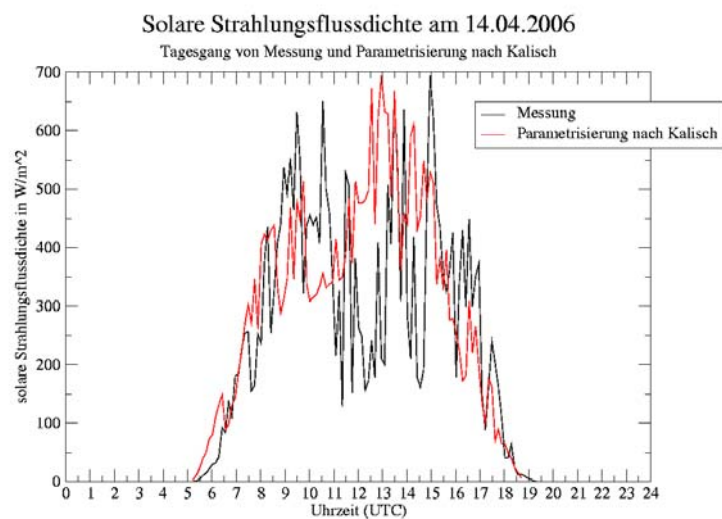
**Abbildung 4.8:** Tagesgang der berechneten (nach Zillman) und gemessenen solaren Strahlungsflussdichte am 14.04.2006

### 4.3.3 Zillman und Kalisch

Die Parametrisierung nach Zillman ergibt ebenfalls für die Morgenstunden des 14.04. zu hohe Einstrahlungswerte. Wie in Abbildung 4.8 zu sehen ist, beträgt die Differenz zur Messung bis zu  $200 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ . Erst bei höheren Bedeckungsgraden am Vormittag (ab 9 Uhr UTC) sowie am Abend (zwischen 15 und 18 Uhr UTC) nähern sich die Strahlungskurven wieder an. Eine Erklärung kann die Unterschätzung des Bedeckungsgrades bei der Auswertung der Wolkenkamerabilder sein. Möglicherweise wird auch die Transmissivität der am Morgen vorhandenen konvektiven Wolken als zu hoch angesehen, weil der Zillman-Algorithmus pauschal auf den Bedeckungsgrad zurückgreift. Die Regressionsgerade in Streudiagramm 4.9 weicht für hohe Strahlungsflussdichten deutlich von der Winkelhalbierenden ab. Auch die Koeffizientenmodifikation nach Kalisch kann diesen Fehler nicht beseitigen; statt dessen ist die Regressionsgerade in Abbildung 4.11 gegenüber 4.9 fast parallel leicht nach unten verschoben.

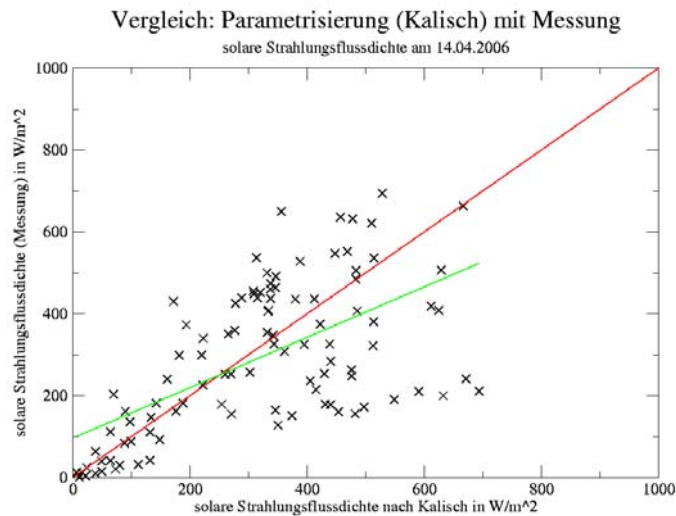


**Abbildung 4.9:** Streudiagramm: Berechnete (nach Zillman) und gemessene solare Strahlungsflussdichte am 14.04.2006



**Abbildung 4.10:** Tagesgang der berechneten (nach Kalisch) und gemessenen solaren Strahlungsflussdichte am 14.04.2006

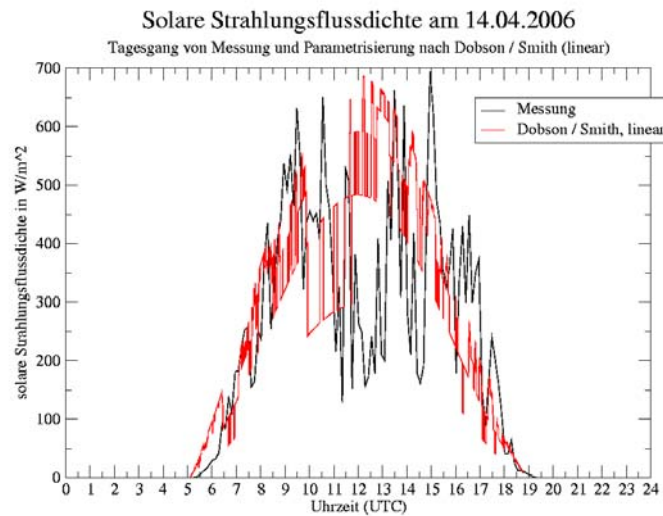




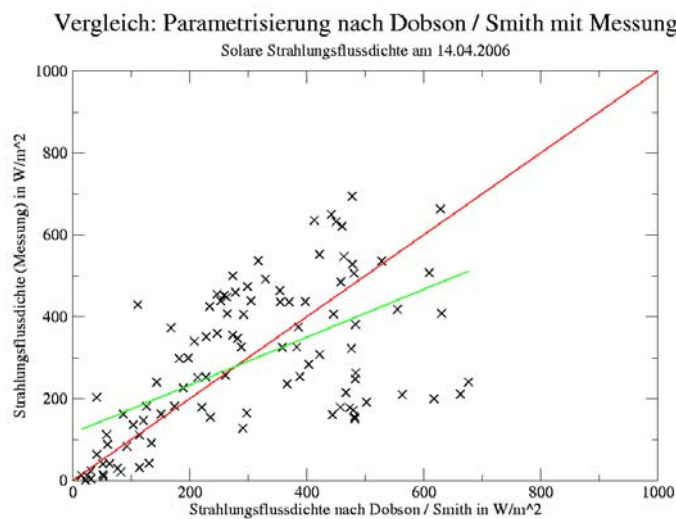
**Abbildung 4.11:** Streudiagramm: Berechnete (nach Kalisch) und gemessene solare Strahlungsflussdichte am 14.04.2006

#### 4.3.4 Dobson / Smith, lineare Parametrisierung

Dieser Algorithmus erzeugt ein Ergebnis, das nur in Teilbereichen mit der gemessenen Einstrahlung verträglich ist. Bis zum Vormittag (8 Uhr UTC) beträgt in Abbildung 4.12 die Abweichung von der Messkurve nur selten mehr als  $100 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ . Die größten Fehler treten bei höheren Sonnenständen und relativ niedrigen Bedeckungsgraden auf, wenn die optische Dicke der Wolken besonders groß ist (in den Mittagsstunden). Dieses Ergebnis findet sich im Streudiagramm 4.13 wieder: Nahe dem Ursprung liegen die Punkte sehr nahe an der Identitätsgeraden. Weiter rechts weitet sich der von den Punkten eingenommene Raum stark auf. Offenbar ist es nicht ausreichend, allein den Bedeckungsgrad als Berechnungsgrundlage zu verwenden.



**Abbildung 4.12:** Tagesgang der berechneten (nach Dobson / Smith, lineare Parametrisierung) und gemessenen solaren Strahlungsflussdichte am 14.04.2006



**Abbildung 4.13:** Streudiagramm: Berechnete (nach Dobson / Smith, lineare Parametrisierung) und gemessene solare Strahlungsflussdichte am 14.04.2006

Somit führt an diesem Beispieltag die nichtlineare Parametrisierung nach Dobson und Smith zu den besten Resultaten. Wegen der Abhängigkeit vom Bedeckungsgrad und von der Wolkenkategorie können Fluktuationen der solaren Strahlungsflussdichte auf kurzer

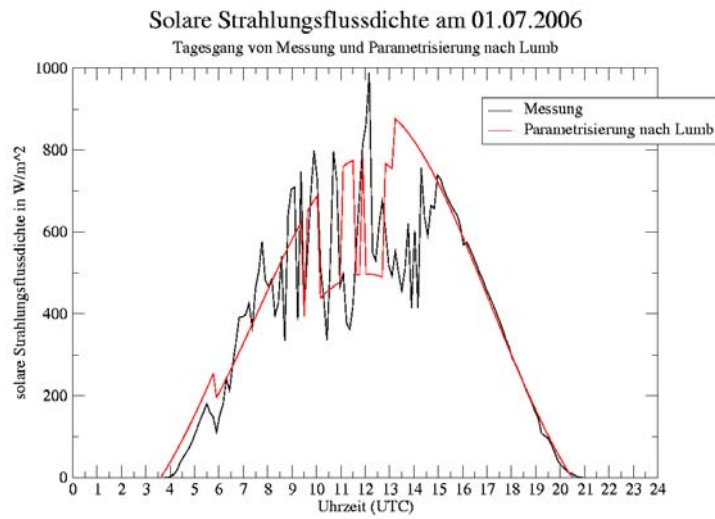
Zeitskala aufgelöst werden, denn die zur Bedeckungsgradbestimmung benutzten Wolkenkamerabilder liegen in viertelminütigen Intervallen vor. Der Zillman-Algorithmus, sowohl in originaler als auch in modifizierter Form, ist aus dem gleichen Grund für inhomogene Bewölkung gut anwendbar.

## **4.4 01.07.2006: sommerliche Cumulus-Bewölkung**

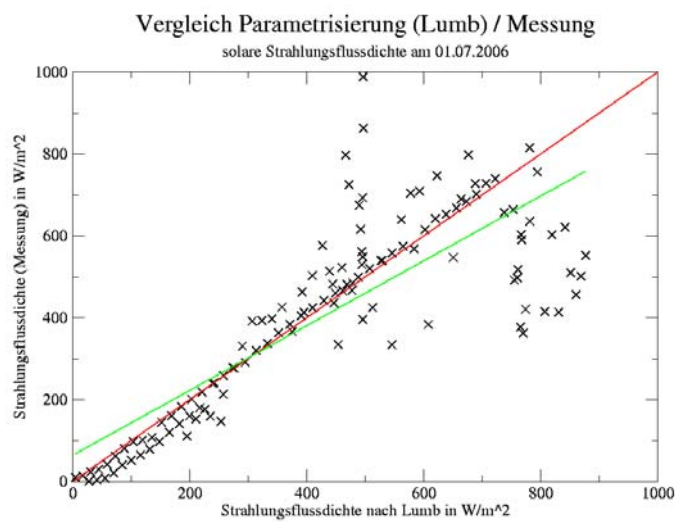
Der 01.07.2006 begann mit gering bewölktem Himmel. In den Morgenstunden waren auf den Wolkenkamerabildern nur wenige Wolken im hohen Niveau zu erkennen. Gegen Mittag entwickelten sich vertikal mächtige konvektive Wolken bis zum Stadium des Cumulus congestus, aus denen allerdings kein Niederschlag fiel. Mit sinkendem Sonnenstand lockerte sich die Bewölkung wieder auf, und gegen Abend war der Himmel fast unbewölkt. Wegen der Einfachheit, die beobachteten Wolkengattungen auf den Kamerabildern zu erkennen, soll dieser Tag zur Parametrisierung ausgewählt werden. Außerdem war die Qualität der Aufnahmen am 01.07.2006 im Vergleich zu anderen Tagen im Frühsommer relativ wenig durch störende Lichtreflexe und Überblendungen beeinträchtigt, wenngleich sie bei hohem Sonnenstand zeitweise auftraten. Ein weiterer Aspekt für die Auswahl dieses Tages war die Frage, wie ein gering bewölkter Himmel sowie eine konvektive Bewölkung mit Strahlungsreflexion an den Wolkenseiten die solare Strahlungsflussdichte beeinflussen.

### **4.4.1 Lumb und Lind**

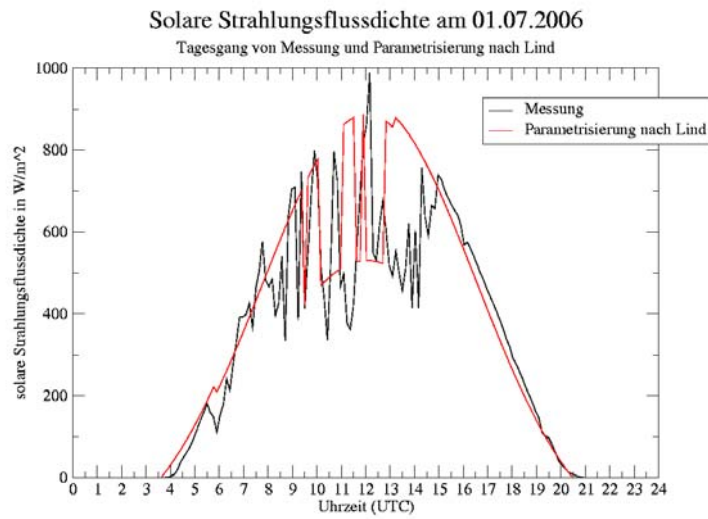
Aus den Parametrisierungen nach Lumb und Lind gehen für den 01.07.2006 ähnliche Ergebnisse hervor, welche in Abbildung 4.14 bis 4.17 veranschaulicht sind. Bei fast unbewölktem Himmel ist jedoch der Algorithmus nach Lumb vorteilhafter, denn ab 15 Uhr UTC folgt die solare Strahlungsflussdichte nach Lumb sehr genau der gemessenen Einstrahlung. Am frühen Morgen liegen in beiden Fällen Differenzen zur Messung vor. Die berechnete Solarstrahlung ist zu hoch, weil Lumb und Lind die am Morgen vorhandenen Cirrus-Wolken nicht eigens behandeln und von unbewölktem Himmel ausgehen. Die Parametrisierungen liefern nicht immer zutreffende Resultate während der Zeit zwischen 7 und 13 Uhr UTC, wo der Himmel durch konvektive Wolken bedeckt ist. Die Fluktuationen, die durch Bedeckung der Sonne entstehen, lassen sich nicht genau wiedergeben. Am frühen Nachmittag (zwischen 13 und 15 Uhr UTC) sorgen flache Cumuli für eine niedrigere Einstrahlung, als sie aus den Parametrisierungen herauskommt. Cumulus-Wolken mit einem Bedeckungsgrad unter 2 Achtel werden nach Lumb und Lind nicht weiter in ihren Entwicklungsstadien unterschieden. So wurde von einer zu geringen Cumulus-Bedeckung und -Dicke ausgegangen. Dennoch liegt im Streudiagramm ein hoher Anteil der Punkte nahe der Winkelhalbierenden, was auf die zutreffend berechnete Strahlungsflussdichte bei gering bewölktem Himmel hindeutet.



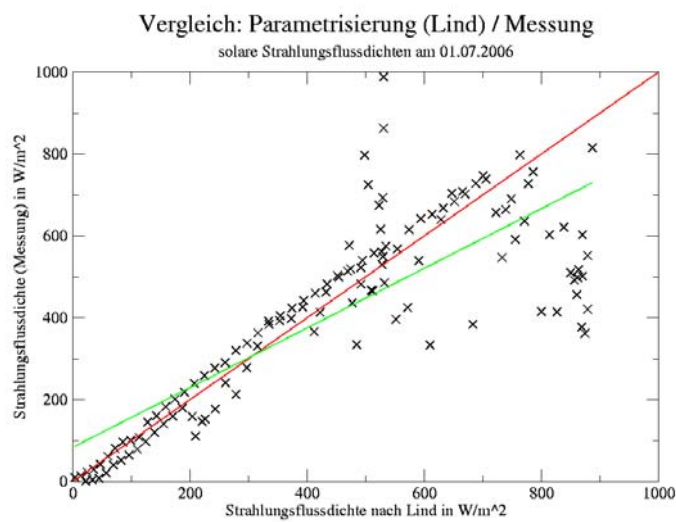
**Abbildung 4.14:** Tagesgang der berechneten (nach Lumb) und gemessenen solaren Strahlungsflussdichte am 01.07.2006



**Abbildung 4.15:** Streudiagramm: Berechnete (nach Lumb) und gemessene solare Strahlungsflussdichte am 01.07.2006



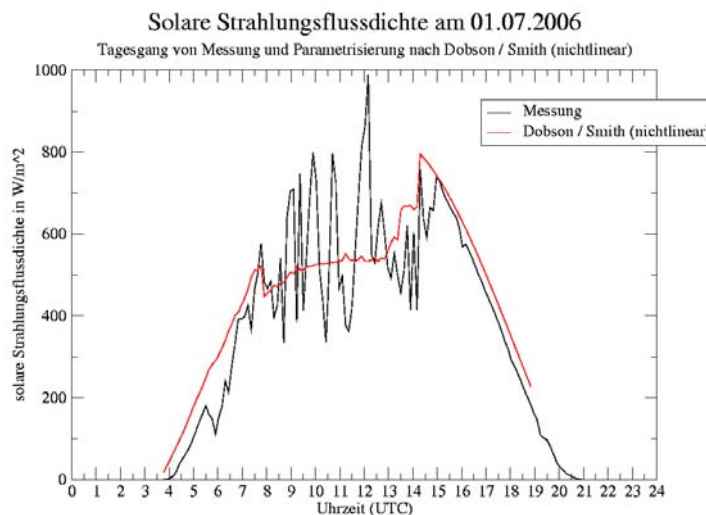
**Abbildung 4.16:** Tagesgang der berechneten (nach Lind) und gemessenen solaren Strahlungsflussdichte am 01.07.2006



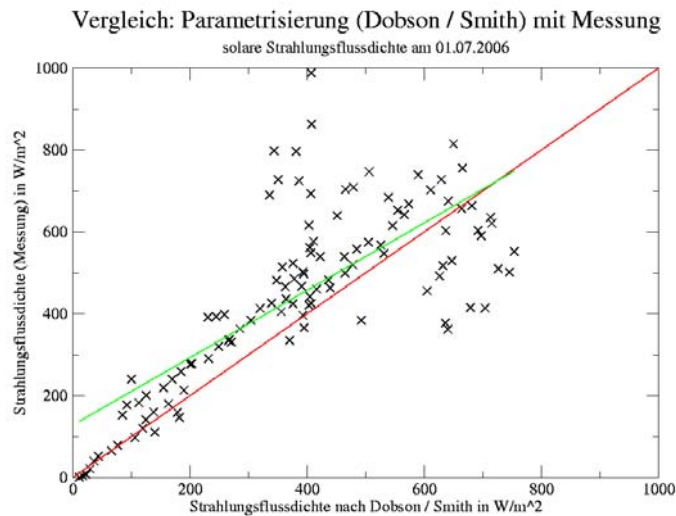
**Abbildung 4.17:** Streudiagramm: Berechnete (nach Lind) und gemessene solare Strahlungsflussdichte am 01.07.2006

#### 4.4.2 Dobson / Smith, nichtlineare Parametrisierung

Die nichtlineare Parametrisierung nach Dobson und Smith liefert bei niedrigem Bewölkungsgrad eine solare Strahlungsflussdichte, die nur etwas höher ist als die Messwerte. Die Regressionsgerade im Streudiagramm 4.19 liegt sehr nahe an der Identitätsgeraden. Eine Vielzahl von Wertepaaren wird durch die Regressionsgerade erfasst und ist bis auf eine fast konstante Differenz identisch mit den Messwerten. Die Abweichung zwischen Parametrisierung und Messung zwischen 7:30 und 15:30 UTC ist ebenso wie bei den Algorithmen nach Lumb und Lind sehr gering. Weil die Wolkenkamerabilder in diesem Intervall wegen der überblendungsbedingt weißlichen Farbe des unbewölkten Himmels teils einen fast konstanten Bedeckungsgrad vortäuschen, ist die Varianz der roten Kurve in Abbildung 4.18 eher klein.



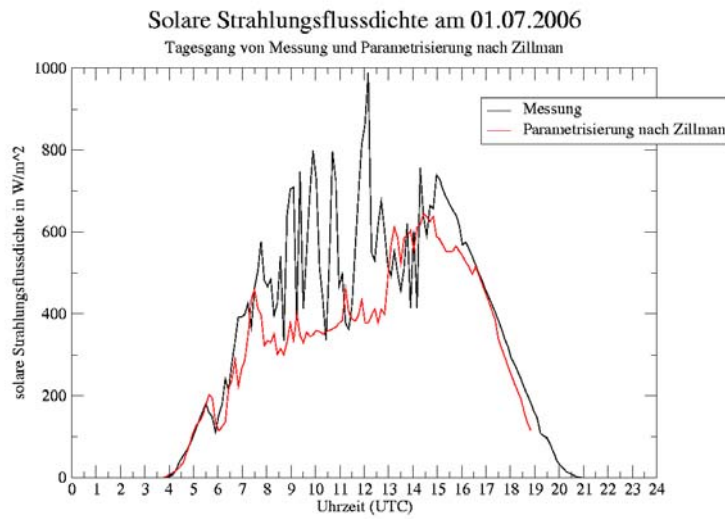
**Abbildung 4.18:** Tagesgang der berechneten (nach Dobson / Smith, nichtlineare Parametrisierung) und gemessenen solaren Strahlungsflussdichte am 01.07.2006



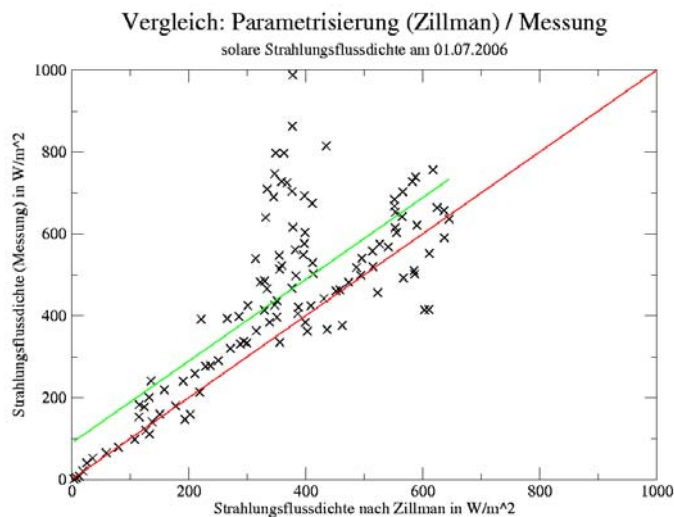
**Abbildung 4.19:** Streudiagramm: Berechnete (nach Dobson / Smith, nichtlineare Parametrisierung) und gemessene solare Strahlungsflussdichte am 01.07.2006

#### 4.4.3 Zillman und Kalisch

Die Original-Parametrisierung nach Zillman und die von Kalisch modifizierte Zillman-Parametrisierung beschreiben den Verlauf der solaren Strahlungsflussdichte am 01.07.2006 relativ genau. Während der Morgen- und Abendstunden, also bei den Minima des Bedeckungsgrades, sind Messwerte und Ergebnisse bei beiden Berechnungen fast gleich. Am Mittag wird durch beide Parametrisierungen allerdings die Solarstrahlung gegenüber dem unbewölkten Himmel deutlich verringert, ohne dass Maxima (infolge von direkter Sonnenstrahlung) auftreten können. Die Regressionsgeraden im Streudiagramm sind in beiden Fällen fast parallel zur Winkelhalbierenden, wobei im Falle der Kalisch-Parametrisierung die Ausgleichsgerade sogar etwas näher an der Identitätsgeraden liegt.

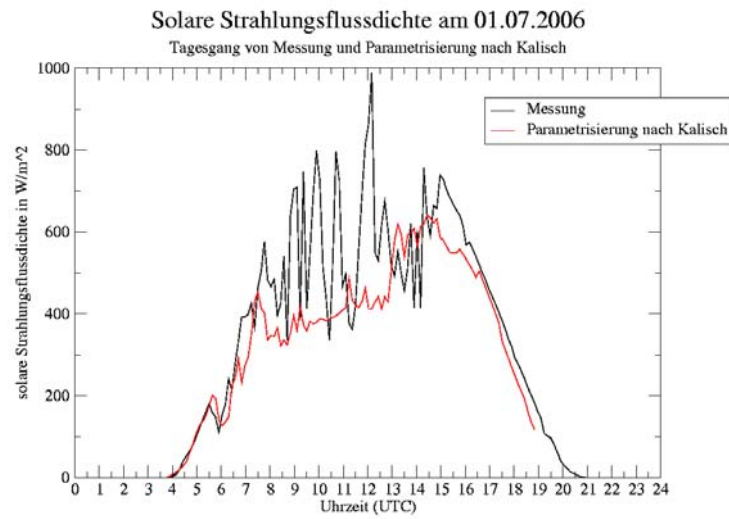


**Abbildung 4.20:** Tagesgang der berechneten (nach Zillman) und gemessenen solaren Strahlungsflussdichte am 01.07.2006

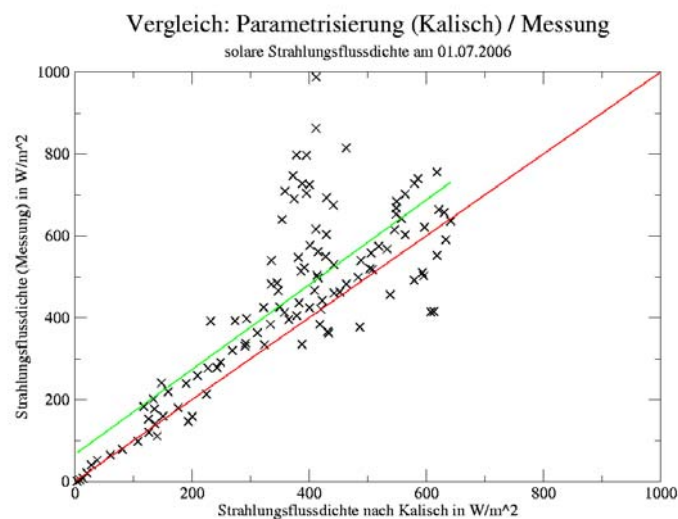


**Abbildung 4.21:** Streudiagramm: Berechnete (nach Zillman) und gemessene solare Strahlungsflussdichte am 01.07.2006





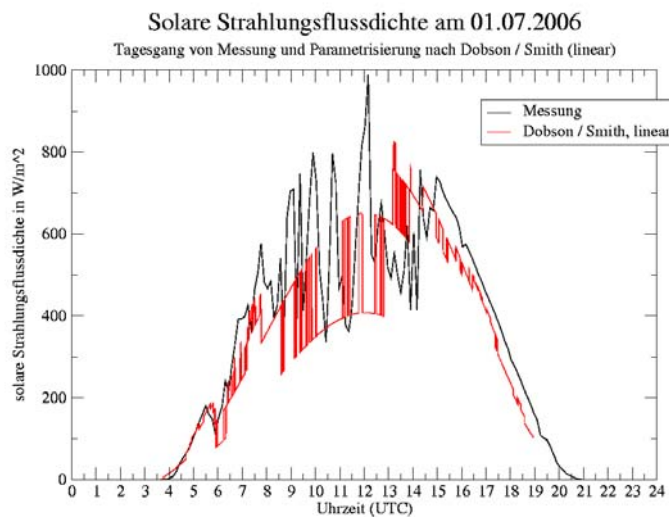
**Abbildung 4.22:** Tagesgang der berechneten (nach Kalisch) und gemessenen solaren Strahlungsflussdichte am 01.07.2006



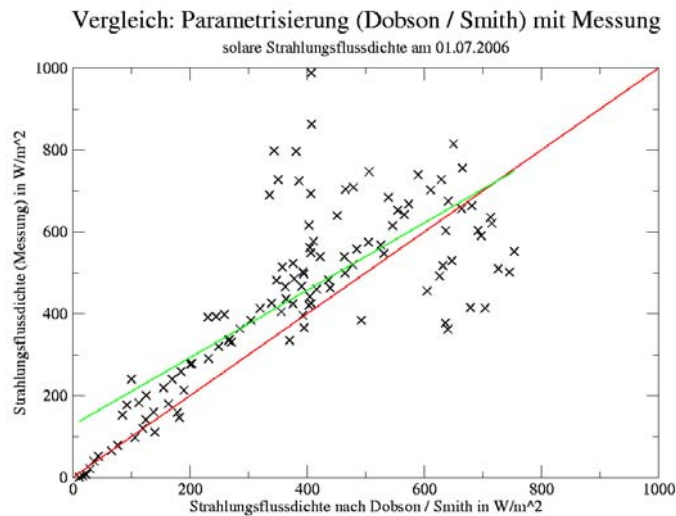
**Abbildung 4.23:** Streudiagramm: Berechnete (nach Kalisch) und gemessene solare Strahlungsflussdichte am 01.07.2006

#### 4.4.4 Dobson / Smith, lineare Parametrisierung

An diesem strahlungsreichen Sommertag ergeben sich aus der Parametrisierung nach Dobson und Smith besonders ab 6 Uhr UTC zu niedrige Werte der solaren Strahlungsflussdichte. Der Einfluss der ab dem Morgen auftretenden Cumulus-Bewölkung wird überschätzt. Broken-Cloud-Situationen, in denen die Einstrahlung etwa so groß ist, wie sie es bei unbewölktem Himmel wäre, werden nicht realitätsnah beschrieben. Eine weitere Fehlerquelle ist die Überschätzung des Bedeckungsgrades durch die Auswertung der Wolkenkamerabilder. Bei hohem Sonnenstand sorgt die scheinbare Weißfärbung des Himmels (Ansätze von Blooming) dafür, dass viele Pixel als Wolke identifiziert werden. So liegen die berechneten Solarstrahlungswerte am Nachmittag und Abend bei unbewölktem Himmel durchweg unterhalb der gemessenen Solarstrahlung.



**Abbildung 4.24:** Tagesgang der berechneten (nach Dobson / Smith, lineare Parametrisierung) und gemessenen solaren Strahlungsflussdichte am 01.07.2006



**Abbildung 4.25:** Streudiagramm: Berechnete (nach Dobson / Smith, lineare Parametrisierung) und gemessene solare Strahlungsflussdichte am 01.07.2006

Insgesamt folgen bei gering bewölktem Himmel alle Parametrisierungen sehr gut den Messwerten. Die Algorithmen nach Lumb und Lind sind auf die dichte Bewölkung in den Mittagsstunden nur bedingt anwendbar: Die Maxima und Minima der Parametrisierung und die Extrema der Messwerte fallen nicht immer zusammen. Die nach Zillman und Dobson / Smith (lineare Parametrisierung) berechnete solare Strahlungsflussdichte liegt am Mittag deutlich unter der gemessenen. Es gelingt zumindest mit dem nichtlinearen Algorithmus nach Dobson und Smith, für die Cumulusbewölkung am Mittag die Abweichungen gering zu halten. Ähnliche Ergebnisse wies diese Formel bereits für die inhomogene Bewölkung des 14.04. auf. Allerdings sorgen Überblendungserscheinungen bei den hohen Sonnenständen am 01.07. für Beeinträchtigungen bei der Bedeckungsgradbestimmung.

## 4.5 04.06.2006: Stratocumulus-Bewölkung

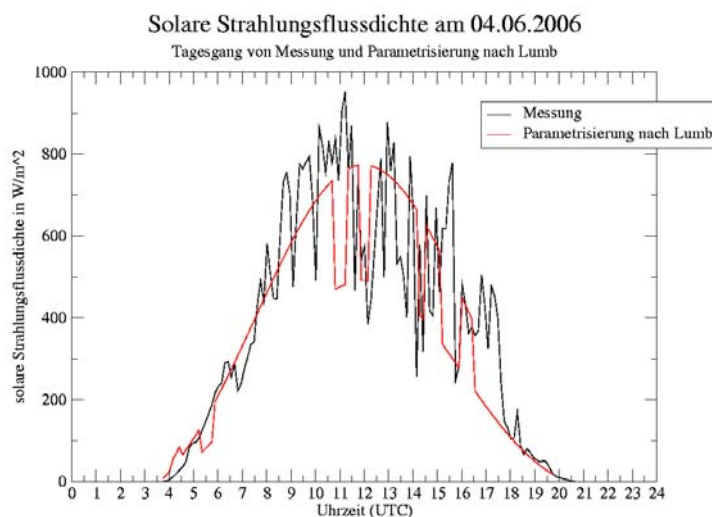
Dieses Beispiel wurde ausgewählt, weil über fast den gesamten durch Wolkenkamerabilder abgedeckten Zeitraum eine einheitliche Wolkengattung (Stratocumulus) am Himmel über Kiel vorherrschte. Damit wurde die Kategorie für die Parametrisierungen nach Lind und Lumb für den Großteil der Zeitserie gleich 2 (vgl. Tabelle 4.1) gesetzt.

In der nichtlinearen Parametrisierung nach Dobson und Smith ist zumeist die Kategorie 5 maßgeblich. Die Einteilung erlaubt keine Unterscheidung der Stratocumuli nach ihrer optischen Dicke, allerdings kann der Himmelszustand durch den Bedeckungsgrad in Gleichung 4.9 berücksichtigt werden.

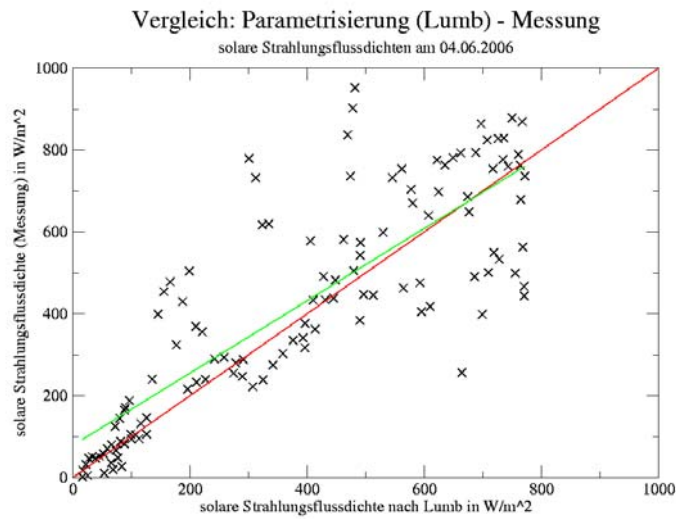
Alle weiteren Algorithmen, die wie in den vorangehenden Unterkapiteln auch in diesem Abschnitt ausgewertet werden, sind von der Wolkengattung unabhängig.

#### 4.5.1 Lumb und Lind

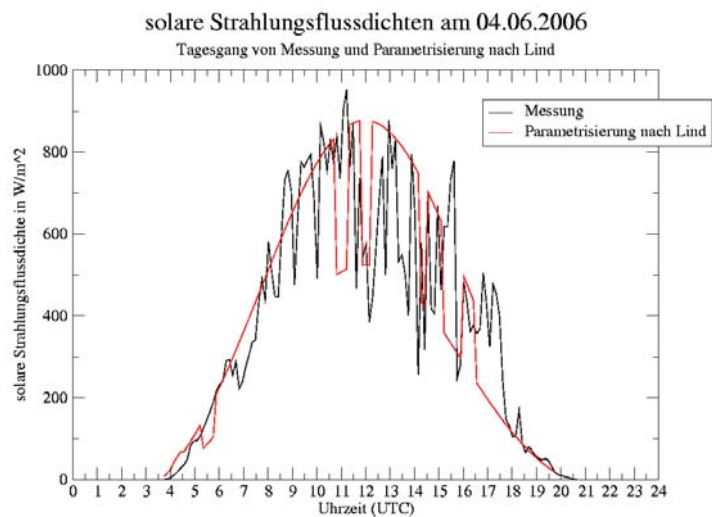
In den Parametrisierungen nach Lumb und Lind wird nur in Einzelfällen von der Einordnung der Bewölkung in Kategorie 2 abgewichen. Besonders in den Nachmittagsstunden und am Abend ist die Wolkenbedeckung allerdings so dicht, dass sie zu Kategorie 6 zugehörig ist. Die Folge ist in beiden Zeitserien der Strahlungsflussdichte, dass diese nicht dem durch den Sonnenstand vorgegebenen Sinus folgt, sondern phasenweise niedrigere Beträge annimmt (vgl. Abbildung 4.26 und 4.28). Diese Abweichungen fallen zeitlich nicht immer mit lokalen Minima der gemessenen Strahlungsflussdichte zusammen, was auf Unzulänglichkeiten bei der optischen Einschätzung des Bedeckungsgrades mit Hilfe der Wolkenkamerabilder schließen lässt. Hier spielt die Überblendung tiefer Wolken oder Wolkenlücken durch Streulicht der Sonne gerade bei hohem Sonnenstand eine Rolle.



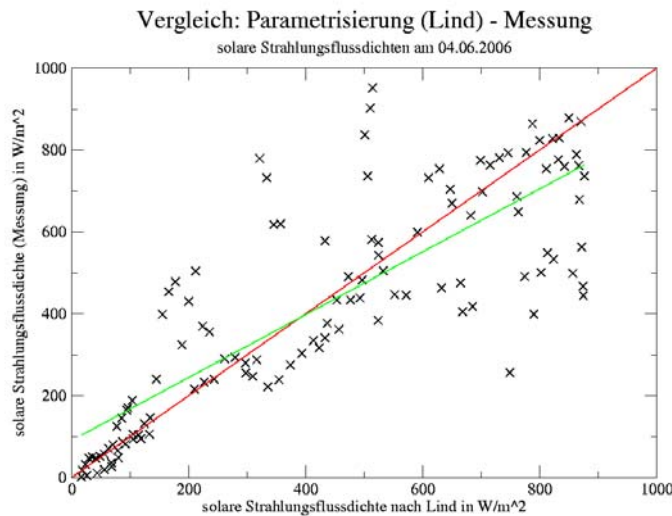
**Abbildung 4.26:** Tagesgang der berechneten (nach Lumb) und gemessenen solaren Strahlungsflussdichte am 04.06.2006



**Abbildung 4.27:** Streudiagramm: Berechnete (nach Lumb) und gemessene solare Strahlungsflussdichte am 04.06.2006



**Abbildung 4.28:** Tagesgang der berechneten (nach Lind) und gemessenen solaren Strahlungsflussdichte am 04.06.2006

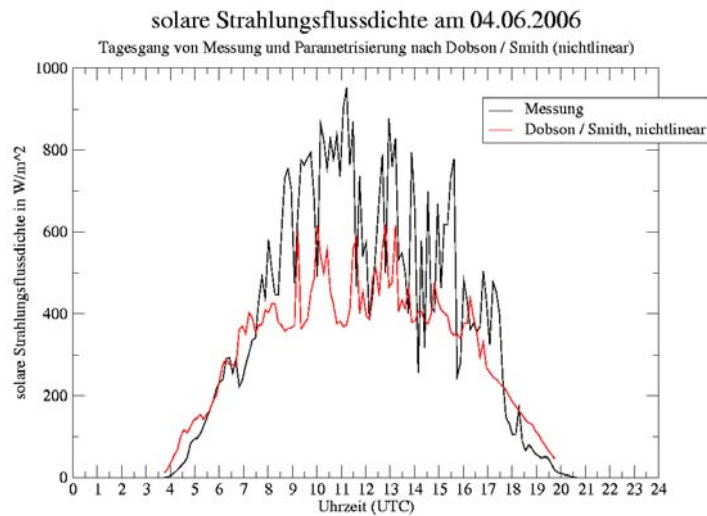


**Abbildung 4.29:** Streudiagramm: Berechnete (nach Lind) und gemessene solare Strahlungsflussdichte am 04.06.2006

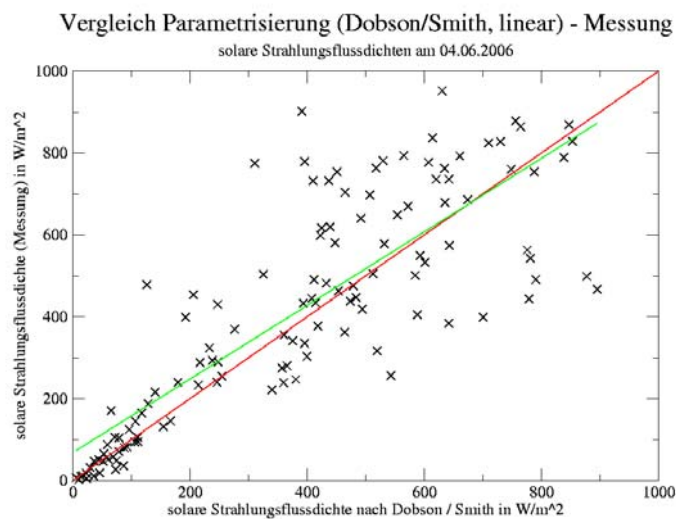
Dennoch ist das Ergebnis besonders bei Betrachtung der Streudiagramme 4.27 und 4.29 zufriedenstellend. Weil sich die graduelle Variabilität der Wolken im Falle der betrachteten Stratocumulus-Bewölkung durch treffend gewählte Koeffizientenpaare und gut voneinander abgrenzbare Kategorien (vgl. Tabellen 4.1 und 4.2 in den Parametrisierungen nach Lumb und Lind am besten ausdrücken lässt, werden von allen betrachteten Algorithmen die besten Ergebnisse für den 04.06.06 erreicht.

#### 4.5.2 Dobson / Smith, nichtlineare Parametrisierung

Wenngleich die nichtlineare Parametrisierung nach Dobson und Smith die solare Strahlungsflussdichte für den 14.04.06 und den 01.07.06 am besten zu reproduzieren vermochte, versagt sie an diesem durch Stratocumuli dominierten Tag.



**Abbildung 4.30:** Tagesgang der berechneten (nach Dobson / Smith, nichtlineare Parametrisierung) und gemessenen solaren Strahlungsflussdichte am 04.06.2006



**Abbildung 4.31:** Streudiagramm: Berechnete (nach Dobson / Smith, nichtlineare Parametrisierung) und gemessene solare Strahlungsflussdichte am 04.06.2006

Besonders in den Mittagsstunden ist die Abweichung zur gemessenen solaren Einstrahlung relativ groß. Ursache ist der niedrige Koeffizient  $E_5$  in Tabelle 4.4, der in der Rangfolge aller auftretenden  $E_i$  nur durch  $E_6$  und  $E_7$  unterboten wird (letztere behandeln Fälle

mit Stratusbewölkung). Je niedriger  $E_i$  ist, desto niedriger ist wegen des Auftretens von  $E_i$  im Exponentialteil von Gleichung 4.9 am Erdboden auftreffende solare Strahlungsflussdichte. Damit behandelt die Einteilung nach Dobson und Smith eine Stratocumulus-Schicht ähnlich wie aufliegende Bewölkung und unterschätzt die durch vorhandene Wolkenlücken empfangene Streustrahlung, welche gemäß Betrachtung der Wolkenkamera-bilder am 04.06.06 beträchtlich sein konnte.

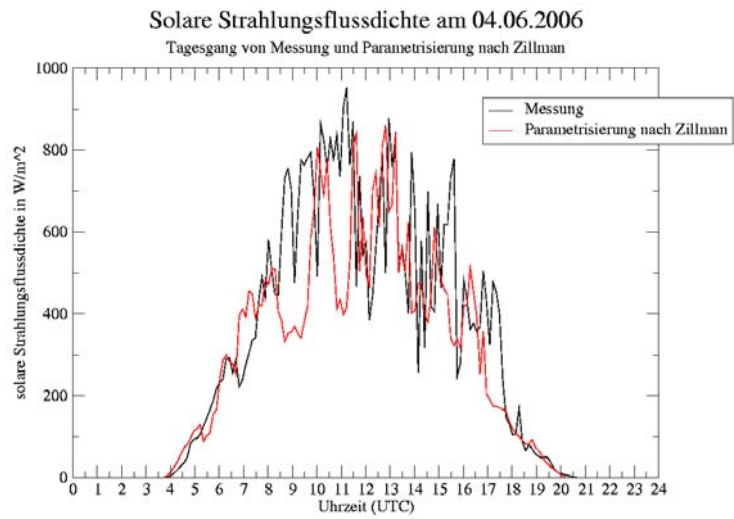
Insgesamt spricht die hohe über den Messzeitraum aufsummierte Differenz zwischen berechneter und gemessener Strahlungsflussdichte dafür, dass das Verfahren für eine durchbrochene Stratocumulus-Schicht ungeeignet ist.

### 4.5.3 Zillman und Kalisch

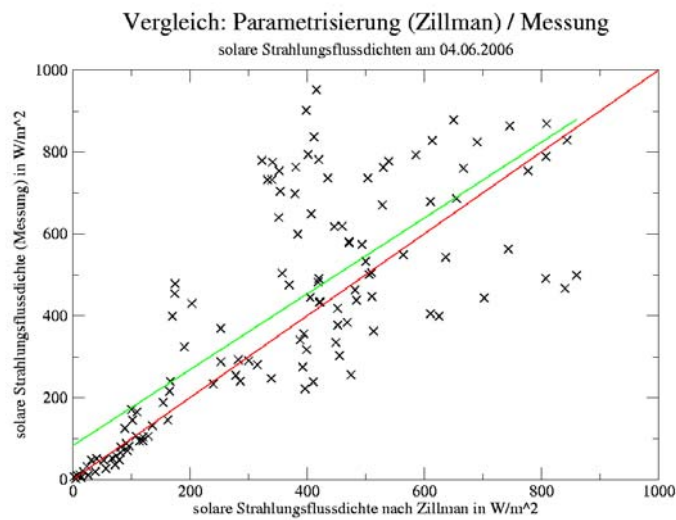
In beide Algorithmen geht der Bedeckungsgrad  $C$  nichtlinear ein, wie Gleichung 4.13 andeutet. Für Bedeckungsgrade nahe 1 ist der Transmissionsfaktor  $T_W$  höher, als es bei einer linearen Abnahme von  $T_W$  mit  $C$  der Fall wäre. Diesem Ansatz ist es zu verdanken, dass bei durchbrochener Bewölkung Streustrahlung und direkte Strahlung durch Wolkenlücken besser beschrieben werden, sodass die Kurve der nach Zillman und Kalisch berechneten solaren Strahlungsflussdichte besonders zwischen 11 und 13 Uhr UTC mit der Messkurve nahezu identisch ist.

Allerdings finden sich in Abbildung 4.32 und 4.34 Zeiträume, in denen das Ergebnis der Parametrisierung weit unter den gemessenen Werten liegt, zum Beispiel zwischen 8 und 10 Uhr UTC. Dies kann durch das Auftreten von Cirrus-Wolken begründet werden. Zwar reichte die Menge dieser hohen Wolken nicht aus, um in den Parametrisierungen nach Lumb, Lind und Dobson/Smith eine Abweichung von den sonst durchgehend verwendeten Kategorien zu rechtfertigen. Aber die vergleichsweise große Anzahl an weißlichen Bildpunkten führte zu einer Überschätzung der wolkenbedingten Extinktion (in Wirklichkeit wurde die direkte Sonnenstrahlung durch die Cirren kaum vermindert, wie aus den Wolkenkamerabildern hervorgeht).

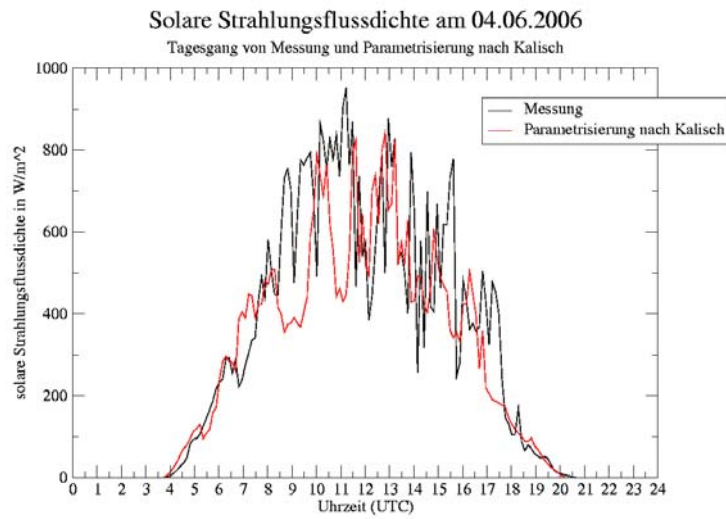




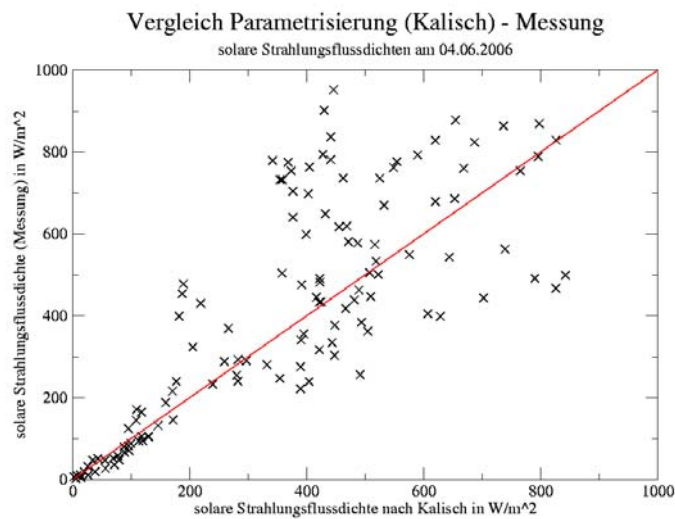
**Abbildung 4.32:** Tagesgang der berechneter (nach Zillman) und gemessenen solaren Strahlungsflussdichte am 04.06.2006



**Abbildung 4.33:** Streudiagramm: Berechnete (nach Zillman) und gemessene solare Strahlungsflussdichte am 04.06.2006



**Abbildung 4.34:** Tagesgang der berechneten (nach Kalisch) und gemessenen solaren Strahlungsflussdichte am 04.06.2006

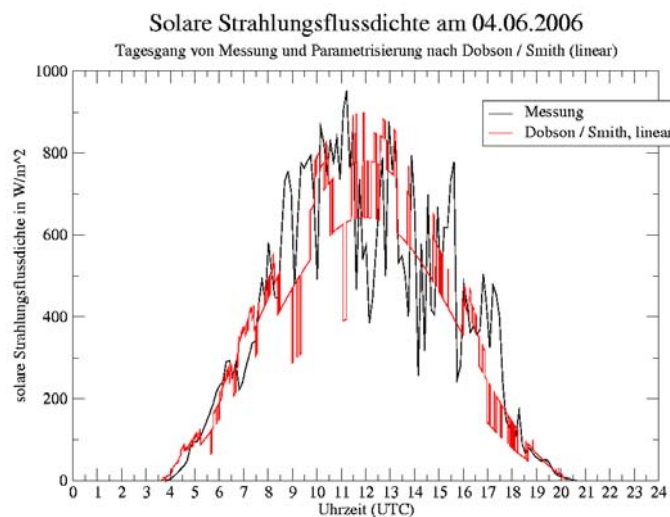


**Abbildung 4.35:** Streudiagramm: Berechnete (nach Kalisch) und gemessene solare Strahlungsflussdichte am 04.06.2006

Die Streudiagramme 4.33 und 4.35 bestätigen die mäßige Genauigkeit der an dieser Stelle behandelten Algorithmen.

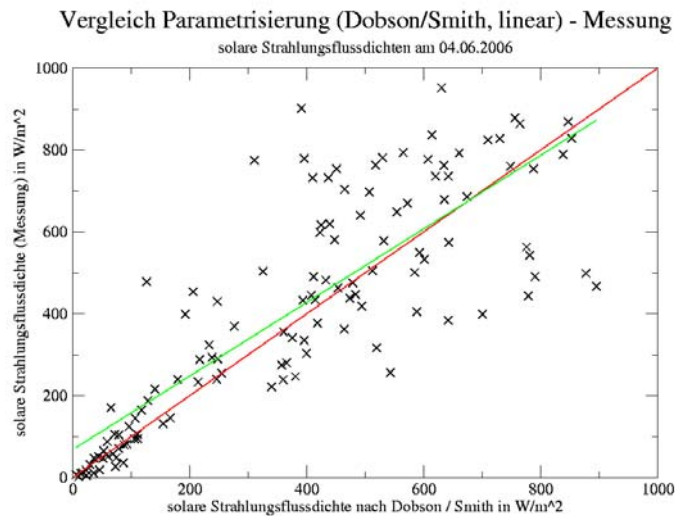
#### 4.5.4 Dobson / Smith, lineare Parametrisierung

Die Kurve der nach der linearen Parametrisierung von Dobson und Smith berechneten solaren Strahlungsflussdichte zeigt in Abbildung 4.36 einzelne Minima, die zum Teil nur Minuten andauern. Diese Minima werden durch kurzfristige Erhöhungen des Bedeckungsgrades hervorgerufen, so dass (vgl. Tabelle 4.3) eine andere Kategorie angenommen wird.



**Abbildung 4.36:** Tagesgang der berechneten (nach Dobson / Smith, lineare Parametrisierung) und gemessenen solaren Strahlungsflussdichte am 04.06.2006

Weil keine Informationen über die optische Dicke der Wolken sowie über eventuell vorhandene Wolkenlücken in die Parametrisierung eingehen, wirkt sich eine Erhöhung des Bedeckungsgrades durchweg vermindern auf die Strahlungsflussdichte aus. Dies ist besonders in dem hier betrachteten Fallbeispiel negativ zu erwähnen, weil sich zeitgleich mit einigen Minima der parametrisierten Strahlung die gemessene Strahlungsflussdichte erhöht (z.B. 10 - 12 Uhr UTC, 16:30 - 18:30 Uhr UTC). Damit leistet auch die lineare Parametrisierung nach Dobson und Smith keine ausreichende Beschreibung des Broken-Cloud-Effektes.



**Abbildung 4.37:** Streudiagramm: Berechnete (nach Dobson / Smith, lineare Parametrisierung) und gemessene solare Strahlungsflussdichte am 04.06.2006

## 4.6 Zusammenfassung

Zur qualitativen Einstufung der Ergebnisse gibt Tabelle 4.5 die Korrelationskoeffizienten der parametrisierten und gemessenen Strahlungsflussdichten an.

	14.04.2006	01.07.2006	04.06.2006
Lumb	0,546	0,818	0,830
Lind	0,543	0,816	0,823
Dobson / Smith	0,569	0,761	0,827
Dobson / Smith (nichtlinear)	0,638	0,841	0,799
Zillman	0,591	0,769	0,768
Kalisch	0,606	0,798	0,790

**Tabelle 4.5:** Korrelationskoeffizienten zwischen gemessener und parametrisierter solarer Strahlungsflussdichte

In Tabelle 4.6 sind die über ein konstantes Zeitintervall des jeweiligen Tages aufsummierten Beträge der Differenzen zwischen parametrisierter und gemessener solarer Strahlungsflussdichte angegeben. Die Länge des jeweiligen Summationsintervalls ist durch das Intervall vorgegeben, in dem Wolkenkamerabilder vorlagen.

	14.04.2006	01.07.2006	04.06.2006
Zeitintervall	5:18 - 17:54 UTC	3:48 - 14:48 UTC	3:45 - 19:45 UTC
Lumb	11.805	11.091	12.904
Lind	12.480	11.949	13.326
Dobson / Smith	12.644	12.665	13.386
Dobson / Smith (nichtlinear)	11.673	10.186	17.274
Zillman	12.336	12.332	15.481
Kalisch	12.014	11.601	14.833

**Tabelle 4.6:** Aufsummierte Differenzen zwischen gemessener und parametrisierter solarer Strahlungsflussdichte in  $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ .

Aus beiden Tabellen geht hervor, dass die nichtlineare Parametrisierung nach Dobson und Smith zwar bei sommerlicher Cumulusbewölkung als auch bei durchbrochener Schauerbewölkung die besten Resultate liefert. Wegen des zu niedrigen Koeffizienten  $E_5$ , der im Falle des 04.06.2006 in die Berechnung eingeht, ist die Qualität des Verfahrens bei stratiformer Bewölkung deutlich vermindert. Das durch Kalisch (2005) gezogene Fazit, dass stratiforme Bewölkung die Genauigkeit aller Algorithmen gegenüber konvektiver Bewölkung verschlechtert, lässt sich nach Tabelle 4.5 nur auf die nichtlineare Formel von Dobson und Smith übertragen.

Falls es gelingt, die vorherrschende Wolkengattung und den zugehörigen Bedeckungsgrad optisch genau zu bestimmen und die zutreffende Wolkenkategorie zu ermitteln, eignen sich die Algorithmen nach Lumb und Lind. Die Lumb-Parametrisierung erzeugt graduell bessere Ergebnisse als die Parametrisierung nach Lind. Bei stark inhomogener Bewölkung ist es entscheidend, den Bedeckungsgrad auf kurzer Zeitskala zu differenzieren, sodass hier die nichtlineare Parametrisierung nach Dobson und Smith sowie der Zillman-Algorithmus gut geeignet sind.

Ansonsten lassen es Tabellen 4.5 und 4.6 nicht zu, eine der vorgestellten Parametrisierungen besonders zu favorisieren. Alle Algorithmen führen zu bestimmten Zeitpunkten der ausgewählten Beispieltage zu großen Abweichungsbeträgen gegenüber den Messwerten. Diese sind aufschlussreich, um in weiteren Arbeiten die Defizite dieser Parametrisierungen aufzuzeigen. Die genauere Erfassung atmosphärischer Parameter wie der optischen Dicke der Wolken mittels Fernerkundung ist für eine Verbesserung der Ergebnisse unerlässlich und soll in einem kurzen Ausblick näher thematisiert werden.



## Kapitel 5

# Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit hat Bilanzen aus solarer und terrestrischer Einstrahlung sowie thermischer Abstrahlung auf der Grundlage mehrjähriger meteorologischer Datensätze erstellt. Frühsommerliche wolkenarme Wetterlagen stellten Bilanzmaxima dar, während die Strahlungsbilanz an frühwinterlichen wolkenarmen Tagen deutlich negativ war.

Im weiteren wurden auf Basis der in der Einleitung vorgestellten Daten bereits erprobte Parametrisierungs-Algorithmen für die lang- und kurzwellige Strahlungsflussdichte angewendet. Es stellte sich heraus, dass es zur Parametrisierung der terrestrischen Strahlung unerlässlich ist, Größen wie Temperatur, Taupunkt und Bedeckungsgrad einzuschließen. Die Formel von Josey et al. (2003) trug gegenüber dem ersten Ansatz zur Verbesserung der Ergebnisse bei, weil sie die Abhängigkeit der Strahlungsflussdichte von Feuchte und Bedeckungsgrad präziser darstellt als es durch die Annahme eines trockenadiabatischen Profils unterhalb der Wolkenbasis und einer linearen Abhängigkeit vom Bedeckungsgrad (vgl. Gleichungen 3.3 und 3.4) der Fall ist. Möglicherweise können die Ergebnisse, die aus Gleichung 3.5 erhalten werden, durch Erweiterung dieser Gleichung um einen Feuchteterm besser mit den gemessenen terrestrischen Strahlungsflussdichten in Einklang gebracht werden.

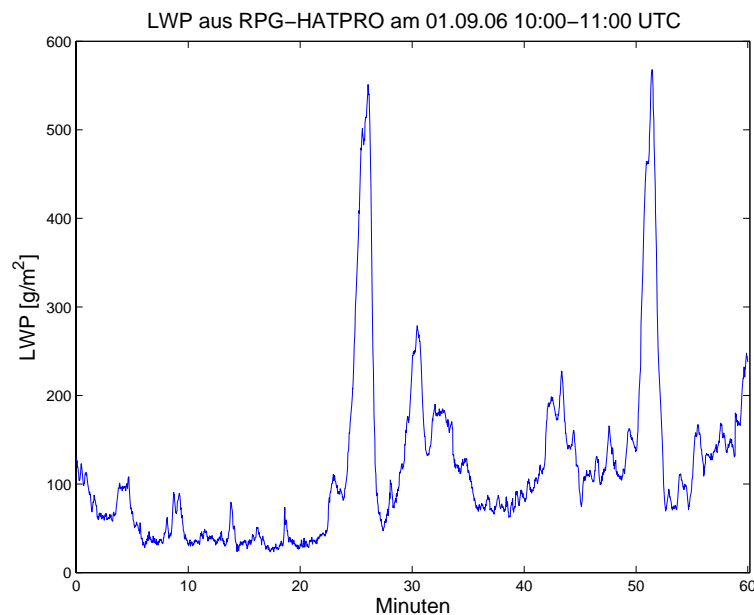
Durch Berücksichtigung der durch Josey vernachlässigten Wolkenhöhe konnte die Korrelation zwischen Messwerten und Parametrisierungsergebnissen leicht erhöht werden. Hierzu reichte eine lineare Abhängigkeit der Wolkenbasistemperatur von der Wolkenhöhe bereits aus. Allerdings birgt die durchgeführte Rechnung die Unzulänglichkeit, dass die Werte des Bedeckungsgrades auf Ceilometermessungen beruhen. Dies bedeutet, dass nur die Information, ob über dem Ceilometer zum Messzeitpunkt eine Wolke vorgelegen hat, in die Parametrisierung eingeht. Ein zweidimensionales Bild des Himmelszustandes kann dadurch in keiner Weise erhalten werden. Dies ist allerdings unverzichtbar, um die Frage zu beantworten, wie stark die Bewölkung in den horizontnahen Himmelssegmenten im thermischen Bereich emittiert.

Es wurden in einem weiteren Kapitel Berechnungen unternommen, um die solare Einstrahlung mit Hilfe der Algorithmen von Lumb (1964), Lind et al. (1984), Dobson und Smith (1988), Zillman (1972) zu parametrisieren. Bedingt durch das Vorhandensein von sehr verschiedenen Wolkentypen an drei ausgewählten Beispieltagen fielen die Ergeb-

nisse für die einzelnen Parametrisierungen recht unterschiedlich aus: Konnte die nicht-lineare Formel von Dobson und Smith in zwei der drei Beispiele die gemessene solare Strahlungsflussdichte noch am besten reproduzieren, so scheiterte ihre Anwendung in einem dritten Beispiel. Es ergab sich der Gesamteindruck, dass keine der untersuchten Parametrisierungen wirklich herausragende Ergebnisse erzielt.

In vielen Fällen konnten die Abweichungen zwischen parametrisierter und gemessener Strahlungsflussdichte auf eine stark inhomogene Bewölkung zurückgeführt werden, die sich durch die vorliegenden Formeln nicht ausreichend berücksichtigen lässt. Dadurch findet eine Über- oder Unterschätzung der Einstrahlung statt. Informationen über diese Größe sind aus den zur Verfügung stehenden meteorologischen Daten nicht zu gewinnen. Abhilfe kann aber durch den Einsatz von Messinstrumenten geschaffen werden, welche eine Vertikalsondierung atmosphärischer Parameter durchführen.

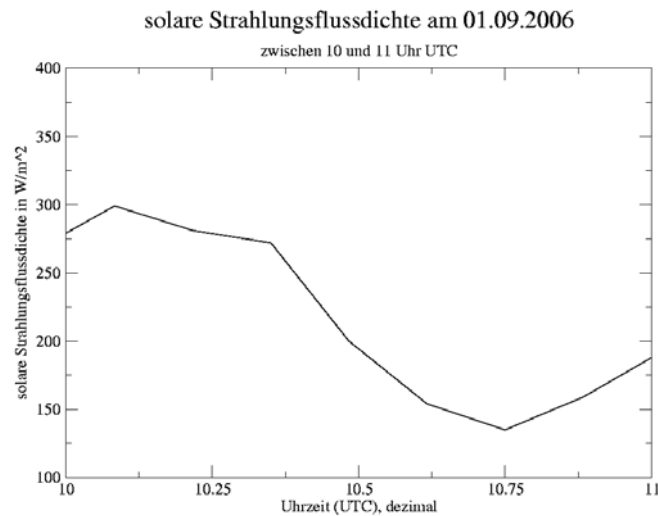
Im August 2006 wurde auf dem Dach des IFM-Geomar-Westgebäudes ein Multikanal-Mikrowellen-Radiometer in Betrieb genommen. Dieses misst durch Sondierung im den Spektralbereichen zwischen 22 und 31, bzw. zwischen 51 und 59 GHz (laut Rose und Czekala (2006)) neben der Vertikalverteilung von Temperatur und Feuchte den Flüssigwasserpfad (LWP). Hieraus kann die optische Dicke der Atmosphäre berechnet werden. Eine Beispielzeitserie des LWP ist in Graphik 5.1 gegeben.



**Abbildung 5.1:** Zeitserie des LWP am 01.09.2006 zwischen 10 und 11 Uhr UTC

Um optisch einen Zusammenhang zwischen LWP und solarer Einstrahlung zu erkennen, ist in Graphik 5.2 die solare Strahlungsflussdichte im gleichen Zeitraum aufgetragen.





**Abbildung 5.2:** Zeitserie der solaren Strahlungsflussdichte am 01.09.2006 zwischen 10 und 11 Uhr UTC

Zwischen 10:00 Uhr und 10:20 Uhr verbleibt der LWP deutlich unter  $100 \frac{\text{g}}{\text{m}^2}$ . Die solare Strahlungsflussdichte nimmt Werte zwischen  $250$  und  $300 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  an. Gegen 10:25 Uhr durchläuft der LWP ein Maximum und beträgt bis zu  $550 \frac{\text{g}}{\text{m}^2}$ . Weil die auf dem Dach des Leibniz-Instituts gemessene solare Strahlungsflussdichte in 8-Minuten-Intervallen gemittelt wird, schlägt sich eine kurzfristige Änderung der optischen Dicke, die durch den LWP bestimmt wird, durchaus auf den Verlauf der Einstrahlungskurve nieder. In diesem Fall erreicht die Solarstrahlung nach dem Maximum des LWP nur noch einen Wert von  $200 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  und nimmt bis etwa 10:45 Uhr auf unter  $150 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  ab. Zugleich fluktuiert der LWP zwischen  $100$  und  $200 \frac{\text{g}}{\text{m}^2}$ , bevor um 10:50 Uhr ein zweites Maximum mit etwa  $550 \frac{\text{g}}{\text{m}^2}$  auftritt. Dennoch steigt die solare Strahlungsflussdichte zum Ende des ausgewählten Zeitabschnittes wieder auf fast  $200 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  an. Ein Teil dieses Anstieges, der an dieser Stelle nicht quantifiziert werden soll, ist aber durch den steigenden Sonnenzenitwinkel zu erklären. Generell ist die Aussagekraft des Vergleiches beider Größen begrenzt, weil die LWP-Daten sekundlich vorliegen und für die solare Strahlungsflussdichte pro Stunde nur durchschnittlich 7,5 Messwerte verfügbar sind. Somit kann die Fluktuation der Solarstrahlung nur bedingt durch die LWP-Zeitserie erklärt werden.

Außer durch bodengebundene Radiometer kann die Fernerkundung von optischer Dicke und LWP auch durch Satelliten (Meteosat 8) stattfinden. Allerdings ist die Sondierung der freien Troposphäre durch Radiometrie - sowohl vom Boden als auch vom Weltraum aus - noch weit von einem flächendeckenden Messnetz entfernt.

Auch die Verteilung der vorherrschenden Bewölkung auf die unterschiedlichen Niveaus ist eine Fehlerquelle für die Parametrisierungen der kurzwelligen Einstrahlung. Sie ist allein durch Ceilometermessung unerfassbar, weil der Laserstrahl bereits an den un-

tersten Metern der Wolkenbasis weggestreut wird (siehe Graphik 1.4). Zur mehrdimensionalen Beschreibung des Bewölkungszustandes, zum Beispiel bei überlappenden Wolkenschichten, kann die Benutzung eines Wolkenradars dienen. Die Veröffentlichung von Mace und Benson-Troth (2002) befasst sich mit der Charakterisierung dieser Überlappungssituationen durch den Einsatz eines 35-GHz Wolkenradars. Die aus Messkampagnen in verschiedenen geographischen Breiten gewonnenen Daten über das Vorhandensein von Wolken werden jeweils zwei benachbarten Wolkenniveaus zugeordnet. Die Wolken-elemente (vgl. Abbildung 1 in Mace und Benson-Troth (2002)) können sich zu einem bestimmten Grad überlappen. Dieser Sachverhalt wird durch den Überlappungsparameter  $\alpha$  quantifiziert.

Der Zahlenwert für  $\alpha$  ist 1, wenn der Überlapp maximal ist (und der Bedeckungsgrad minimal ist), und tendiert für beliebige Wolkenverteilungen gegen 0. Wie stark der Jahresgang von  $\alpha$  in vier ausgewählten Höhenniveaus ausgeprägt sein kann, demonstriert Abbildung 8 in Mace und Benson-Troth (2002).

Somit liegt die Schlussfolgerung nahe, dass einerseits der Bedeckungsgrad auf genaueren Bestimmungen beruhen muss, als es durch ein Ceilometer gegeben sein kann. Andererseits ergeben sich durch Kenntnis der optischen Dicke und dreidimensionalen Wolkenstruktur Perspektiven, um die Fehler bei der Berechnung der lang- und kurzwelligen Strahlungsflussdichte zu verringern.

In Wetter- und Klimamodellen kann bereits ein kleiner Fehler, den eine der berechneten meteorologischen Größen aufweist, wegen der Nichtlinearität des physikalischen Systems Atmosphäre nach wenigen Zeitschritten auf große Beträge anwachsen. Die Strahlungsflussdichte - im thermischen und im sichtbaren Spektralbereich - ist in diesen Modellen wegen ihrer Eigenschaft als Maß für die Energieübertragung zwischen Boden und Atmosphäre von entscheidender Bedeutung, weil sich Fehlbeträge auf mehrere Modellkomponenten übertragen. Entsprechend sollte es das Anliegen dieser Arbeit sein, auf Grundlage von langjährigen Beobachtungen existierende Algorithmen zu analysieren und Optimierungsmöglichkeiten aufzuzeigen. Desweiteren bietet es sich an, diese Beobachtungen mit Strahlungstransportrechnungen in Klimamodellen zu vergleichen und die Modellparametrisierungen damit abzustimmen.

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Übersicht über das elektromagnetische Spektrum. Nach Macke (2004) . . .	2
1.2	Energie-Bilanzschema unseres Planeten nach Kiehl und Trenberth (1997) .	3
1.3	Ceilometer-Meldung (Bezeichnung gemäß Vaisala (2002): Message 2) mit Hexadezimalcode . . . . .	5
1.4	Ein Beispiel für eine durch CTVIEW erzeugte Darstellung der Wolkenbasisshöhe . . . . .	6
1.5	Lageplan der meteorologischen Messstationen im Bereich Kiel (Quelle: Internetpräsenz des Leibniz-Institutes für Meeresforschung) . . . . .	9
2.1	Wetterlage am 28.05.2005 um 0 Uhr UTC. Alle Bodenanalysen nach Wetterzentrale (2006a) . . . . .	13
2.2	Bodendruck- und 500 hPa-Geopotenzial-Reanalyse für den 28.05.2005. Alle Reanalyse-Karten nach Wetterzentrale (2006b) . . . . .	14
2.3	Wetterlage am 29.05.2005 um 0 Uhr UTC . . . . .	14
2.4	Wetterlage am 21.06.1998 um 0 Uhr UTC . . . . .	15
2.5	Bodendruck- und 500 hPa-Geopotenzial-Reanalyse für den 21.06.1998 . .	16
2.6	Wetterlage am 22.06.1998 um 0 Uhr UTC . . . . .	17
2.7	Wetterlage am 13.12.2002 um 0 Uhr UTC . . . . .	18
2.8	Bodendruck- und 500 hPa-Geopotenzial-Reanalyse für den 13.12.2002 . .	19
2.9	Wetterlage am 14.12.2002 um 0 Uhr UTC . . . . .	19
2.10	Wetterlage am 15.12.2003 um 0 Uhr UTC . . . . .	21
2.11	Wetterlage am 16.12.2003 um 0 Uhr UTC . . . . .	21
2.12	Jahresverlauf der Beiträge zur Strahlungsbilanz im Jahr 2003 . . . . .	23
2.13	Wetterlage am 09.07.1999 um 0 Uhr UTC . . . . .	24
2.14	Wetterlage am 10.07.1999 um 0 Uhr UTC . . . . .	25
2.15	Wetterlage am 06.12.2002 um 0 Uhr UTC . . . . .	26
2.16	Bodendruck- und 500 hPa-Geopotenzial-Reanalyse für den 06.12.2002 . .	26
2.17	Wetterlage am 07.12.2002 um 0 Uhr UTC . . . . .	27
3.1	Streudiagramm: Terrestrische Strahlungsflussdichte in Abhängigkeit von der Bodentemperatur mit linearer Regression . . . . .	31
3.2	Streudiagramm aus berechneter und gemessener terrestrischer Strahlungsflussdichte . . . . .	32

3.3	Verhaeltnis aus berechneter und gemessener terrestrischer Strahlungsflussdichte in Abhängigkeit von der Wolkenhoehe . . . . .	33
3.4	Verhältnis aus berechneter und gemessener terrestrischer Strahlungsflussdichte in Abhängigkeit von der Wolkenhoehe: Regressionsgeraden für Bedeckungsgrade 1/8 bis 8/8 . . . . .	34
3.5	Verlauf von Wolkenhöhe, $\eta$ und Bedeckungsgrad am 6. und 7. Februar 2003	36
3.6	Differenz zwischen berechneter (nach Josey et al. (2003)) und gemessener langwelliger Gegenstrahlung 2003 . . . . .	39
3.7	Streudiagramm: gemessene und berechnete (nach Josey et al. (2003)) langwellige Gegenstrahlung 2003 . . . . .	40
3.8	Streudiagramm: gemessene und (nach Josey et al. (2003)) berechnete langwellige Gegenstrahlung 2003, bedeckter Himmel . . . . .	41
3.9	Streudiagramm: gemessene und (nach Josey et al. (2003)) berechnete langwellige Gegenstrahlung 2003, unbewölkter Himmel . . . . .	42
3.10	Streudiagramm: gemessene und (nach Josey et al. (2003)) berechnete langwellige Gegenstrahlung 2003, Bewölkung von 0 und 1 verschieden . . . .	43
3.11	Verlauf von gemessener und parametrisierter langwelliger Gegenstrahlung am 6./7. Februar 2003 . . . . .	45
3.12	Variation des Korrekturterms $h$ mit der Wolkenhöhe . . . . .	46
3.13	Streudiagramm: gemessene und berechnete (neue Parametrisierung) langwellige Gegenstrahlung 2003 . . . . .	47
3.14	Streudiagramm: gemessene und berechnete (neue Parametrisierung) langwellige Gegenstrahlung 2003 . . . . .	47
3.15	Streudiagramm: gemessene und berechnete (neue Parametrisierung) langwellige Gegenstrahlung 2003 . . . . .	48
3.16	Streudiagramm: gemessene und berechnete (neue Parametrisierung) langwellige Gegenstrahlung 2003 . . . . .	48
3.17	Verlauf von gemessener und parametrisierter Gegenstrahlung am 6./7. Februar 2003 . . . . .	49
3.18	Differenzen zwischen Messung und Parametrisierung der Gegenstrahlung am 6./7. Februar 2003 . . . . .	49
4.1	Tagesgang der berechneten (nach Lumb) und gemessenen solaren Strahlungsflussdichte am 14.04.2006 . . . . .	57
4.2	Streudiagramm: Berechnete (nach Lumb) und gemessene solare Strahlungsflussdichte am 14.04.2006 . . . . .	57
4.3	Tagesgang der berechneten (nach Lind) und gemessenen solaren Strahlungsflussdichte am 14.04.2006 . . . . .	58
4.4	Streudiagramm: Berechnete (nach Lind) und gemessene solare Strahlungsflussdichte am 14.04.2006 . . . . .	58
4.5	Tagesgang der berechneten (nach Dobson / Smith, nichtlineare Parametrisierung) und gemessenen solaren Strahlungsflussdichte am 14.04.2006 . .	59

4.6	Streudiagramm: Berechnete (nach Dobson / Smith, nichtlineare Parametrisierung) und gemessene solare Strahlungsflussdichte am 14.04.2006 . . .	60
4.7	Verlauf der solaren Strahlungsflussdichte (Institut und Leuchtturm) am 27.07.2002. Graphik aus eigenem Datenbestand reproduziert. . . . .	60
4.8	Tagesgang der berechneten (nach Zillman) und gemessenen solaren Strahlungsflussdichte am 14.04.2006 . . . . .	61
4.9	Streudiagramm: Berechnete (nach Zillman) und gemessene solare Strahlungsflussdichte am 14.04.2006 . . . . .	62
4.10	Tagesgang der berechneten (nach Kalisch) und gemessenen solaren Strahlungsflussdichte am 14.04.2006 . . . . .	62
4.11	Streudiagramm: Berechnete (nach Kalisch) und gemessene solare Strahlungsflussdichte am 14.04.2006 . . . . .	63
4.12	Tagesgang der berechneten (nach Dobson / Smith, lineare Parametrisierung) und gemessenen solaren Strahlungsflussdichte am 14.04.2006 . . . .	64
4.13	Streudiagramm: Berechnete (nach Dobson / Smith, lineare Parametrisierung) und gemessene solare Strahlungsflussdichte am 14.04.2006 . . . . .	64
4.14	Tagesgang der berechneten (nach Lumb) und gemessenen solaren Strahlungsflussdichte am 01.07.2006 . . . . .	66
4.15	Streudiagramm: Berechnete (nach Lumb) und gemessene solare Strahlungsflussdichte am 01.07.2006 . . . . .	66
4.16	Tagesgang der berechneten (nach Lind) und gemessenen solaren Strahlungsflussdichte am 01.07.2006 . . . . .	67
4.17	Streudiagramm: Berechnete (nach Lind) und gemessene solare Strahlungsflussdichte am 01.07.2006 . . . . .	67
4.18	Tagesgang der berechneten (nach Dobson / Smith, nichtlineare Parametrisierung) und gemessenen solaren Strahlungsflussdichte am 01.07.2006 . .	68
4.19	Streudiagramm: Berechnete (nach Dobson / Smith, nichtlineare Parametrisierung) und gemessene solare Strahlungsflussdichte am 01.07.2006 . .	69
4.20	Tagesgang der berechneten (nach Zillman) und gemessenen solaren Strahlungsflussdichte am 01.07.2006 . . . . .	70
4.21	Streudiagramm: Berechnete (nach Zillman) und gemessene solare Strahlungsflussdichte am 01.07.2006 . . . . .	70
4.22	Tagesgang der berechneten (nach Kalisch) und gemessenen solaren Strahlungsflussdichte am 01.07.2006 . . . . .	71
4.23	Streudiagramm: Berechnete (nach Kalisch) und gemessene solare Strahlungsflussdichte am 01.07.2006 . . . . .	71
4.24	Tagesgang der berechneten (nach Dobson / Smith, lineare Parametrisierung) und gemessenen solaren Strahlungsflussdichte am 01.07.2006 . . . .	72
4.25	Streudiagramm: Berechnete (nach Dobson / Smith, lineare Parametrisierung) und gemessene solare Strahlungsflussdichte am 01.07.2006 . . . . .	73
4.26	Tagesgang der berechneten (nach Lumb) und gemessenen solaren Strahlungsflussdichte am 04.06.2006 . . . . .	74

4.27 Streudiagramm: Berechnete (nach Lumb) und gemessene solare Strahlungsflussdichte am 04.06.2006 . . . . .	75
4.28 Tagesgang der berechneten (nach Lind) und gemessenen solaren Strahlungsflussdichte am 04.06.2006 . . . . .	75
4.29 Streudiagramm: Berechnete (nach Lind) und gemessene solare Strahlungsflussdichte am 04.06.2006 . . . . .	76
4.30 Tagesgang der berechneten (nach Dobson / Smith, nichtlineare Parametrisierung) und gemessenen solaren Strahlungsflussdichte am 04.06.2006 . . . . .	77
4.31 Streudiagramm: Berechnete (nach Dobson / Smith, nichtlineare Parametrisierung) und gemessene solare Strahlungsflussdichte am 04.06.2006 . . . . .	77
4.32 Tagesgang der berechneten (nach Zillman) und gemessenen solaren Strahlungsflussdichte am 04.06.2006 . . . . .	79
4.33 Streudiagramm: Berechnete (nach Zillman) und gemessene solare Strahlungsflussdichte am 04.06.2006 . . . . .	79
4.34 Tagesgang der berechneten (nach Kalisch) und gemessenen solaren Strahlungsflussdichte am 04.06.2006 . . . . .	80
4.35 Streudiagramm: Berechnete (nach Kalisch) und gemessene solare Strahlungsflussdichte am 04.06.2006 . . . . .	80
4.36 Tagesgang der berechneten (nach Dobson / Smith, lineare Parametrisierung) und gemessenen solaren Strahlungsflussdichte am 04.06.2006 . . . . .	81
4.37 Streudiagramm: Berechnete (nach Dobson / Smith, lineare Parametrisierung) und gemessene solare Strahlungsflussdichte am 04.06.2006 . . . . .	82
5.1 Zeitserie des LWP am 01.09.2006 zwischen 10 und 11 Uhr UTC . . . . .	86
5.2 Zeitserie der solaren Strahlungsflussdichte am 01.09.2006 zwischen 10 und 11 Uhr UTC . . . . .	87
A.1 Jahresverlauf der Beiträge zur Strahlungsbilanz im Jahr 1998 . . . . .	95
A.2 Jahresverlauf der Beiträge zur Strahlungsbilanz im Jahr 1999 . . . . .	96
A.3 Jahresverlauf der Beiträge zur Strahlungsbilanz im Jahr 2001 . . . . .	96
A.4 Jahresverlauf der Beiträge zur Strahlungsbilanz im Jahr 2002 . . . . .	97
A.5 Jahresverlauf der Beiträge zur Strahlungsbilanz im Jahr 2004 . . . . .	97
A.6 Jahresverlauf der Beiträge zur Strahlungsbilanz im Jahr 2005 . . . . .	98

# Tabellenverzeichnis

1.1	Zusammensetzung des solaren Spektrums zwischen 0,29 und 4,0 $\mu\text{m}$ nach DWD (1987) . . . . .	1
1.2	Radiometrische Messgrößen und ihre Einheiten nach Liou(1980) . . . . .	4
2.1	Jährliche Extrema der Bilanz aus solarer und thermischer Strahlungsflussdichte, Angaben in $\frac{\text{W}\cdot\text{h}}{\text{m}^2}$ . . . . .	12
2.2	Synoptische Daten der Wetterstation Kiel-Holtenau am 28.05.2005 . . . . .	12
2.3	Aufschlüsselung der Strahlungsbilanz des 28.05.2005, Angaben in $\frac{\text{W}\cdot\text{h}}{\text{m}^2}$ . . . . .	13
2.4	Aufschlüsselung der Strahlungsbilanz des 21.06.1998, Angaben in $\frac{\text{W}\cdot\text{h}}{\text{m}^2}$ . . . . .	15
2.5	Aufschlüsselung der Strahlungsbilanz des 13.12.2002, Angaben in $\frac{\text{W}\cdot\text{h}}{\text{m}^2}$ . . . . .	18
2.6	Synoptische Daten der Wetterstation Kiel-Holtenau am 13.12.2002 . . . . .	18
2.7	Aufschlüsselung der Strahlungsbilanz des 15.12.2003, Angaben in $\frac{\text{W}\cdot\text{h}}{\text{m}^2}$ . . . . .	20
2.8	Synoptische Daten der Wetterstation Kiel-Holtenau am 15.12.2003 . . . . .	20
2.9	Extrema der Tagessummen der solaren Strahlungsflussdichte, Angaben in $\frac{\text{W}\cdot\text{h}}{\text{m}^2}$ . . . . .	23
2.10	Synoptische Daten der Wetterstation Kiel-Holtenau am 09.07.1999 . . . . .	24
2.11	Synoptische Daten der Wetterstation Kiel-Holtenau am 06.12.2002 . . . . .	25
3.1	Korrelation der berechneten mit der gemessenen terrestrischen Strahlungsflussdichte in Abhängigkeit vom Bedeckungsgrad . . . . .	34
3.2	SYNOP-Meldungen der Wetterstation Kiel-Holtenau am 6. und 7. Februar 2003 . . . . .	35
3.3	Koeffizienten in der Parametrisierung nach Josey et al. (2003) (Alle Werte in der Einheit Kelvin) . . . . .	38
3.4	Korrelation zwischen gemessener und parametrisierter langwelliger Strahlungsflussdichte . . . . .	44
3.5	Korrelation zwischen gemessener und parametrisierter langwelliger Strahlungsflussdichte . . . . .	44
4.1	Koeffizienten in Gleichung 4.8 nach Lumb (1964) . . . . .	53
4.2	Koeffizienten in Gleichung 4.8 nach Lind et al. (1984) . . . . .	54
4.3	Koeffizienten in Gleichung 4.8 nach Dobson und Smith (1988) . . . . .	54
4.4	Koeffizienten in Gleichung 4.9 nach Dobson und Smith (1988) . . . . .	55

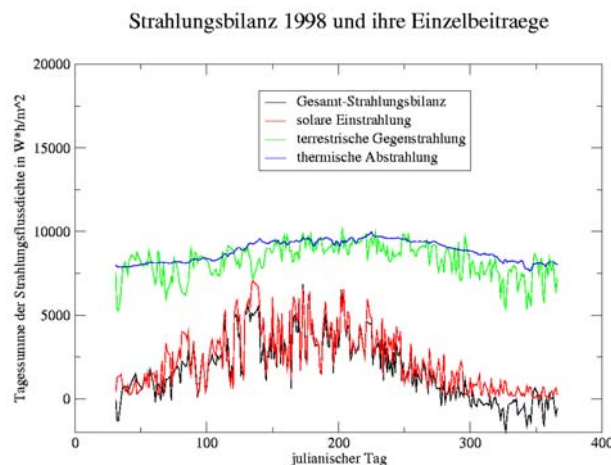
4.5	Korrelationskoeffizienten zwischen gemessener und parametrisierter solarer Strahlungsflussdichte . . . . .	82
4.6	Aufsummierte Differenzen zwischen gemessener und parametrisierter solarer Strahlungsflussdichte in $\frac{W}{m^2}$ . . . . .	83
B.1	Abkürzungen der Wolkengattungen . . . . .	99
B.2	Wolkenschlüsselzahlen SZ nach DWD (1982) . . . . .	100



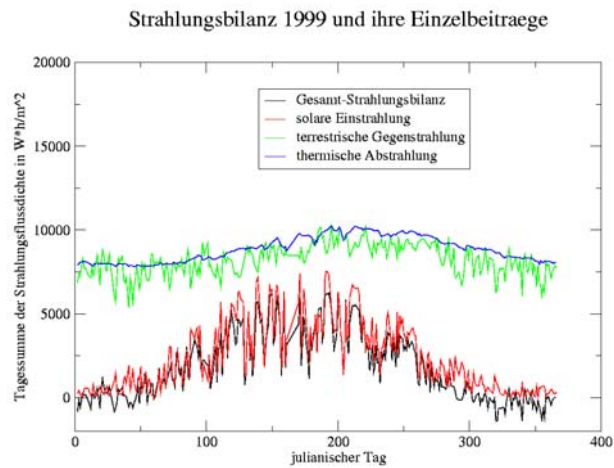
## Anhang A

# Jahresgänge der täglichen Strahlungsbilanzen und ihrer Beiträge

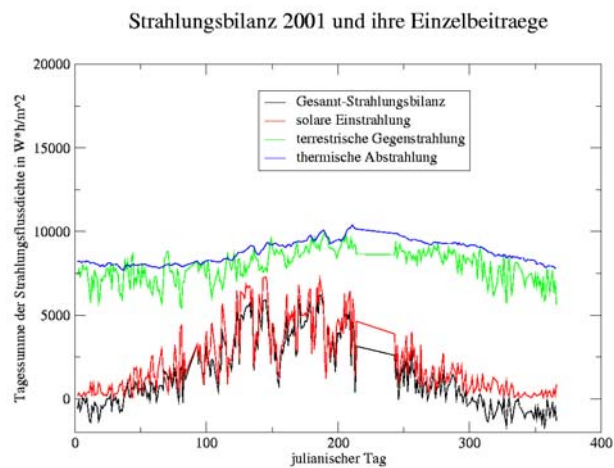
Um die Klimatologie der täglichen Strahlungsbilanzen über das in Graphik 2.12 abgebildete Beispieljahr 2003 hinaus fortzuführen, werden die weiteren verfügbaren Jahresgänge der Tagesbilanzen in den Abbildungen A.1 bis A.6 dargestellt. Wegen größerer Datenlücken fehlt eine Graphik für 2000.



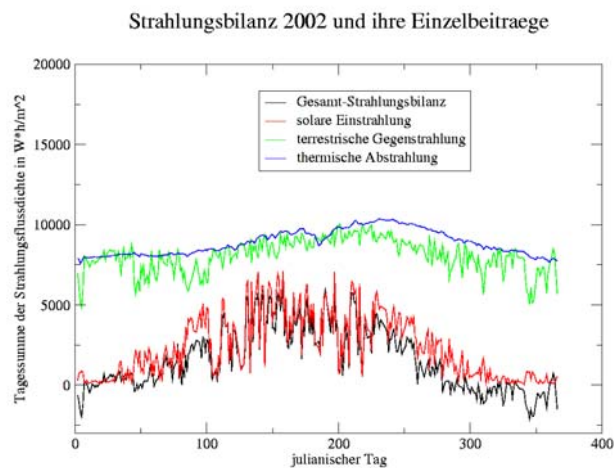
**Abbildung A.1:** Jahresverlauf der Beiträge zur Strahlungsbilanz im Jahr 1998



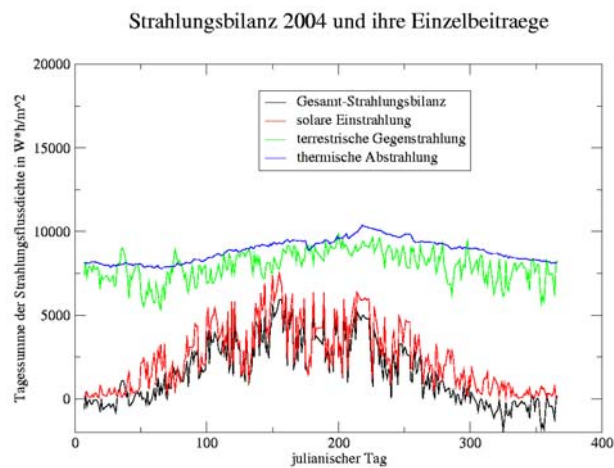
**Abbildung A.2:** Jahresverlauf der Beiträge zur Strahlungsbilanz im Jahr 1999



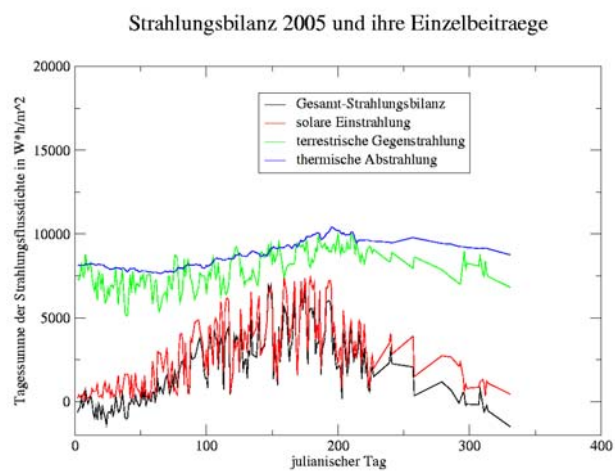
**Abbildung A.3:** Jahresverlauf der Beiträge zur Strahlungsbilanz im Jahr 2001



**Abbildung A.4:** Jahresverlauf der Beiträge zur Strahlungsbilanz im Jahr 2002



**Abbildung A.5:** Jahresverlauf der Beiträge zur Strahlungsbilanz im Jahr 2004



**Abbildung A.6:** Jahresverlauf der Beiträge zur Strahlungsbilanz im Jahr 2005

## Anhang B

# Abkürzungen und Wolkenschlüssel

Zur Erläuterung der Abkürzungen in den synoptischen Beobachtungen sind diese in Tabelle B.1 den 10 Wolkengattungen gegenübergestellt. Tabelle B.2 gibt die den Schlüsselzahlen in Tabelle 4.4 zugeordneten Wolkenformen wieder.

Abkürzung	Wolkentyp
ci	Cirrus
cs	Cirrostratus
cc	Cirrocumulus
ac	Alto cumulus
as	Altostratus
ns	Nimbostratus
sc	Strato cumulus
cu	Cumulus
cb	Cumulonimbus
st	Stratus

**Tabelle B.1:** *Abkürzungen der Wolkengattungen*

Niveau	SZ	Wolkentyp
	0	unbewölkter Himmel (alle Niveaus)
C <sub>L</sub> (tiefe Wolken)	1	flacher Cumulus (humilis)
	2	vertikal ausgedehnter Cumulus (mediocris / congestus)
	3	Cumulonimbus (unstrukturierte Oberseite)
	4	Stratocumulus (aus Cumulus entstanden)
	5	Stratocumulus (nicht aus Cumulus entstanden)
	6	Stratus (unstrukturierte Basis)
	7	Stratus-Fetzen (fractus)
	8	Cumulus und Stratocumulus (unterschiedliche Niveaus)
	9	Cumulonimbus mit Eisamboss (incus)
C <sub>M</sub> (mittelhohe Wolken)	1	halbdurchsichtiger Altostratus
	2	dichter Alto- oder Nimbostratus
	3	halbdurchsichtiger Altocumulus (1 Niveau)
	4	linsenförmiger Altocumulus (lenticularis)
	5	halbdurchsichtiger, aufziehender Altocumulus
	6	Altocumulus, aus Cumulus entstanden
	7	dichter Altocumulus in mehreren Schichten, nicht aufziehend
	8	Altocumulus mit cumulusartigen Quellungen (castellanus / floccus)
	9	Altocumulus bei chaotischem Himmel
C <sub>H</sub> (hohe Wolken)	1	Cirrus-Fasern (nicht aufziehend)
	2	dichter Cirrus (spissatus)
	3	dichter Cirrus, aus Cumulonimbus entstanden
	4	aufziehender, hakenförmiger Cirrus (uncinus)
	5	beginnender Aufzug von Cirrus und Cirrostratus
	6	wie C <sub>H</sub> 5, Himmel fast bedeckt
	7	Cirrostratus, den Himmel ganz bedeckend
	8	Cirrostratus, nicht aufziehend, den Himmel nicht bedeckend
	9	Cirrocumulus (allein oder mit wenig Cirrus / Cirrostratus)

Tabelle B.2: Wolkenschlüsselzahlen SZ nach DWD (1982)

# Literaturverzeichnis

- Dobson, F. W. und Smith, S. D., 1988. Bulk models of solar radiation at sea. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 114, 165–182.
- DWD, 1982. Vorschriften und Betriebsunterlagen Nr. 2. Wetterschlüsselhandbuch Band B.
- DWD, 1987. Leitfaden für die Ausbildung im Deutschen Wetterdienst, Nr.1, Allgemeine Meteorologie.
- Heise, C., 2004. Der Einfluss durchbrochener Bewölkung auf die solare Einstrahlung: Eine Studie für Kiel, Diplomarbeit. Leibniz-Institut für Meereswissenschaften an der Universität Kiel.
- Josey, S. A., Pascal, R. W., Taylor, K. P., und Yelland, M. J., 2003. A new formula for determining the atmosphere longwave flux at the ocean surface at mid-high latitudes. *J. Geophys. Res.*, 108(C4)(3108). Doi:10.1029/2002JC001418.
- Kalisch, J., 2005. Parametrisierungen der solaren Einstrahlung über dem Ozean im Rahmen des 'Meridional Ocean Radiation Experiment' MORE, Diplomarbeit. Leibniz-Institut für Meereswissenschaften.
- Kiehl, J. und Trenberth, K., 1997. Earth's annual global energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 197–208.
- Lind, R. J., Katsaros, K. B., und Gube, M., 1984. Radiation budget components and their parameterizations in JASIN. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 110, 1061–1071.
- Liou, K.-N., 1980. *An introduction to atmospheric radiation*. Academic Press.
- Lumb, F. E., 1964. The influence of cloud on hourly amounts of total solar radiation at the sea surface. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 90, 43–56.
- Mace, G. G. und Benson-Troth, S., 2002. Cloud-layer overlap characteristics derived from long-term cloud radar data. *J. Climate*, 15, 2505–2515.
- Macke, A., 2004. Skript zur Vorlesung Strahlung, Sommersemester 2004.
- Rose, T. und Czekala, H., 2006. *RPG-HATPRO, RPG-TEMPRO, RPG-HUMPRO Humidity and Temperature Profilers Operating Manual*. Radiometer Physics GmbH.

- Schade, N., 2005. Experimentelle Erfassung und Interpolation der solaren Einstrahlung bei durchbrochener Bewölkung, Diplomarbeit. Leibniz-Institut für Meereswissenschaften an der Universität Kiel.
- Vaisala, 2002. *Ceilometer CT25K User's Guide*.
- Wetterzentrale, 2006a. Archiv der 00 UTC UKMO-Bracknell-Bodenanalysekarten. <http://www.wetterzentrale.de/topkarten/fsfaxsem.html>.
- Wetterzentrale, 2006b. Archiv der NCEP-Reanalysis. <http://www.wetterzentrale.de/topkarten/fsraeur.html>.
- Wetterzentrale, 2006c. Berechnung von Sonnenauf- und -untergangszeiten. <http://www.wetterzentrale.de/sunrised.htm>.
- WMO - No.8, 1996. *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. Secretariat of the World Meteorological Organisation, Geneva, Switzerland, 6. Auflage.
- Zillman, J., 1972. *A study of some aspects of the radiation and heat budgets of the southern hemisphere oceans*. Bureau of Meteorology, Dept. of the Interior, Canberra, Australia.



## **Danksagung**

Ich möchte mich bei meinem Betreuer, Herrn Prof. Dr. Andreas Macke, für die Ideen und Anregungen zu meiner Arbeit sowie für die Korrektur bedanken. Ich bedanke mich außerdem bei der Arbeitsgruppe Wolken und Strahlung, speziell bei Nils Schade und John Kalisch für die Einweisung in die Themen ihrer Arbeiten und bei Sebastian Wahl für die spontane Hilfe bei technischen Problemen. Ein großer Dank gilt Ute Hecht und Frauke Nevoigt für die freundliche Bereitstellung des umfangreichen Datenmaterials, desweiteren danke ich Frau Prof. Dr. Kirstin Krüger für die Zweitkorrektur.

Ganz besonders bedanke ich mich bei meinen Eltern sowie bei meiner Freundin Katrin Streicher für die Unterstützung während meiner Diplomarbeit.



## **Erklärung**

Hiermit bestätige ich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Ich versichere, dass diese Arbeit noch nicht zur Erlangung eines Diplomgrades an anderer Stelle vorgelegen hat.

Kiel, Januar 2007

(Torben Meinert)